

Teresa de Jesus Caldeira Torres Rodrigues
Mestre em Física Laboratorial, Ensino e História da Física

Sobre o Ensino da Teoria da Relatividade Restrita

Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em
Ciências da Educação

Orientador: Doutor Vítor Duarte Teodoro, Professor Auxiliar
Aposentado da Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade Nova de Lisboa

Co-orientador: Doutor Fernando Parente, Professor Catedrático
Aposentado da Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Doutora Maria Paula Pires dos Santos Diogo, Professora Catedrática da
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Arguente: Doutor Jorge António de Carvalho Sousa Valadares, Professor Associado
com Agregação Aposentado da Universidade Aberta

Arguente: Doutora Mariana de Jesus Pedreira Valente, Professora Auxiliar da
Universidade de Évora

Vogal: Doutor José Paulo Moreira dos Santos, Professor Associado com
Agregação da Faculdade de Ciências Da Universidade Nova de Lisboa

Vogal: Doutor Francisco José Brito Peixoto, Professor Auxiliar do ISPA —Instituto
Universitário de Ciências Psicológicas Sociais e da Vida

Vogal: Doutor Vítor Manuel Neves Duarte Teodoro, Professor Auxiliar Aposentado
da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa



dezembro 2017

Copyright © Teresa de Jesus Caldeira Torres Rodrigues, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através dos repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Ao meu marido e ao meu filho

Aos meus Pais

Agradecimentos

O meu primeiro agradecimento é para o meu orientador, Prof. Doutor Vítor Teodoro, pelo seu entusiasmo, pelos seus ensinamentos, pelo modo claro de abordar os assuntos, por ter acreditado na minha capacidade para executar este trabalho, permitindo alargar os meus horizontes sobre a física, o ensino da física e outros temas. E também, por todo o apoio e disponibilidade ao longo destes anos.

O meu muito obrigado ao Professor Doutor Fernando Parente, pela sua disponibilidade, os seus ensinamentos oportunos e pelo acompanhamento deste trabalho sobre a Teoria da Relatividade Restrita, e também, ao Prof. Doutor Jorge Valadares, pelos seus aconselhamentos.

À Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa pela atribuição da bolsa de estudo, sem a qual não seria possível concretizar este projeto.

Não posso deixar de agradecer ao Prof. Doutor João Correia de Freitas, pelas conversas esclarecedoras e pelo encorajamento em prosseguir.

Aos participantes do estudo por aceitarem contribuir para este estudo.

Aos meus amigos e colegas Carolina Montelobo, Cristina Pissarra, Alda Jardineiro, Isabel Lourenço, Alice Gonçalves, Inácia Capucho, Maria José Caetano, Sandra Correia, Ana Machado, Ana Teresa Mata, António Nunes, Paulo Abreu, Susana Frade, Ilda Nunda, Ana Rita Lopes, Sandra Almeida e Paula Teixeira que me incentivaram sempre em prosseguir.

Ao Diretor do Agrupamento de Escolas António Gedeão, Dr. José Godinho, pelo incentivo e por possibilitar-me um horário para o frequentar este curso.

Aos meus irmãos, à minha família, pelo apoio e compreensão da minha indisponibilidade.

E a todos que contribuíram para que este trabalho chegasse a bom termo.

Resumo

Neste trabalho apresentamos uma proposta didática do ensino da Teoria da Relatividade Restrita (TRR), fundamentada na Psicologia da Aprendizagem, na História das Ideias e na investigação em Ensino da Física.

Fizemos uma pesquisa e análise da literatura publicada em revistas científicas e em dissertações, em documentos e em livros, das dificuldades conceituais existentes nos alunos e nos professores e das propostas didáticas existentes.

Elaboramos dois instrumentos investigativos, para a recolha de dados, de uma amostra de conveniência não aleatória. Um dos instrumentos (teste) foi aplicado num seminário de formação de professores e a alunos do 12.º ano do Ensino Secundário. Os resultados obtidos estão de acordo com os existentes na literatura e também sugerem a construção de um quadro conceptual em que coexistem as ideias espontâneas e os raciocínios relativistas, einsteinianos e galileanos. O outro instrumento, inquérito por questionário também foi aplicado a professores, com o objetivo de avaliar o ensino da Teoria da Relatividade Restrita e a proposta didática elaborada sobre esse ensino. E também a alunos, mas com questões adaptadas.

Este trabalho pretende contribuir para uma melhor compreensão dos processos de ensino e de aprendizagem da TRR, obter uma metodologia validada com materiais para os professores fundamentados nessa metodologia e apoiar os autores de currículos na integração curricular de tópicos complexos e avançados ao nível não superior.

Palavras-chave

Teoria da Relatividade Restrita; Ensino Secundário; concepções alternativas; ensino e aprendizagem de física.

Abstract

In this work we present a didactic proposal to teach the Theory of Special Relativity based on the Psychology of Learning, Science History, and research in Physics Education.

We made a research of the literature published in scientific journals and dissertations, documents and books, conceptual difficulties of students and teachers and didactic proposals.

We prepared two investigative tools for collecting data from a non-random sample of convenience. One of the instruments (test) was implemented in a teacher workshop and with pupils of secondary school. The results are consistent with existing literature and also suggest the construction of a conceptual framework, in which the spontaneous ideas and relativistic reasoning, einsteinian and galilean, coexist. The other instrument, questionnaire survey, was also applied to teachers, to assess Theory of Special Relativity education and elaborated didactic, and with pupils but with adapted questions.

This work aims to contribute to a better understanding of the processes of teaching and learning Theory of Special Relativity, become a validated methodology material for teachers based on this methodology and supporting the authors of curricula that can teach complex topics and advanced level, not higher.

Keywords: Theory of Special Relativity; Secondary Education; misconceptions; teaching and learning of physics.

Índice

Agradecimentos	vii
Resumo	ix
Abstract	xi
Índice	xiii
Índice de figuras	xvii
Índice de tabelas	xix
Lista de abreviaturas e siglas	xxi
1 Introdução	1
1.1 Porquê ensinar a Teoria da Relatividade Restrita?	1
1.2 Objetivos do estudo e questões de investigação	4
1.3 Estrutura da tese.....	5
2 Revisão da literatura sobre o ensino e a aprendizagem da TRR	7
2.1 Um olhar sobre a história das ideias e as suas implicações no ensino das ciências.....	7
2.1.1 História das ideias e o ensino das ciências	7
2.1.2 História das ideias relacionada com a TRR.....	10
2.2 Dificuldades conceptuais em ciência: Uma introdução	11
2.3 Dificuldades do ensino e da aprendizagem na TRR	13
2.3.1 Dificuldades conceptuais na TRR	13
2.3.2 Algumas propostas didáticas existentes na literatura	31
2.4 Teorias da aprendizagem	35
2.4.1 Aprendizagem significativa.....	36
2.4.2 Relação da aprendizagem significativa com as outras teorias da aprendizagem.....	40
2.5 Transposição didática	42
2.5.1 O que é a transposição didática?	42
2.5.2 Como o saber sobrevive?	42

2.5.3	Marcadores-estruturantes	43
2.5.4	Algumas considerações sobre a transposição didática	44
3	Uma proposta didática: fundamentação e descrição	45
3.1	Fundamentação teórica	45
3.2	Descrição da proposta.....	46
3.2.1	A Experiência de Michelson-Morley (1887).....	46
3.2.2	Simultaneidade dos Acontecimentos.....	48
3.2.3	Dilatação do Tempo	50
3.2.4	Contração do Espaço	51
4	Dois estudos de caso	55
4.1	Estudo com professores	55
4.1.1	Metodologia e participantes	55
4.1.2	Resultados e análise dos resultados do teste.....	57
4.1.3	Algumas conclusões do teste.....	61
4.1.4	Resultados e análise dos resultados do questionário	62
4.1.5	Algumas conclusões do questionário	72
4.2	Estudo com alunos.....	74
4.2.1	Metodologia e participantes	74
4.2.2	Resultados e análise dos resultados do teste.....	75
4.2.3	Algumas conclusões do teste.....	78
4.2.4	Resultados e análise dos resultados do questionário	79
4.2.5	Algumas conclusões.....	80
5	Considerações finais e algumas reflexões.....	83
5.1	Principais conclusões do estudo	83
5.2	Limitações do estudo	86
5.3	Sugestões para futuras investigações.....	87

Referências..... 89

Anexos..... 93

Índice de figuras

Figura 1.1 Relação entre a computação, a experimentação e a teoria na construção do conhecimento científico (Shodor Education Foundation, 2005).	2
Figura 2.1 Resposta de um estudante graduado à questão sobre a ordem das erupções dos vulcões para um sismólogo, a meio dos dois vulcões, e o seu assistente, junto a Mt. Rainier (p. S34).	21
Figura 2.2 Diagramas do paradoxo do comboio para o observador no referencial Terra (p. 1241). (a) Diagrama dado aos estudantes, em que o observador na Terra está no centro das marcas deixadas pelos 2 flashes. (b) Exemplo de um diagrama desenhado por um estudante que ilustra como o Alan (referencial Terra) observa os flashes a atingirem a Beth (referencial comboio).	24
Figura 2.3 Diagrama do paradoxo do comboio para o referencial do comboio (p. 1243). Exemplo de um diagrama que ilustra a resposta dos estudantes à propagação dos sinais no referencial do comboio (Beth).	25
Figura 2.4 Diagrama da diferenciação progressiva e da reconciliação integradora, assim como da reconciliação horizontal, mostrando que são independentes e simultâneos na estrutura cognitiva e no ensino (adaptado de Moreira, 2012; 2013).	39
Figura 3.1 Imagem do Interómetro de Michelson- Morley e respetivos esquemas.	47
Figura 3.2 Sequência de slides da descrição e explicação da experiência de Mickelson-Morley	47
Figura 3.3 Sequência de slides para explicar a simultaneidade dos acontecimentos	49
Figura 3.4 Sequência de slides da construção do diagrama espaço-tempo	50
Figura 3.5 Sequência de slides para explicar a relação entre os tempos medidos em referenciais diferentes	51
Figura 3.6 Sequência de slides para explicar a relação entre os comprimentos da carruagem medidos em referenciais diferentes.	52
Figura 3.7 Animação criada no <i>software Geogebra</i> de um diagrama espaço-tempo	53
Figura 3.8 <i>Diagrama em V</i> da proposta didática.	54
Figura 4.1 Teste para avaliar as conceções da TRR.	56
Figura 4.2 Questionário para avaliar o ensino da TRR e a proposta didática sobre esse ensino.	57

Índice de tabelas

Tabela 2.1 Características típicas de raciocínios baseados na TRR, relatividade galileana e “cinemática espontânea”	18
Tabela 2.2 Síntese dos estudos sobre as dificuldades conceituais da TRR	28
Tabela 4.1 Resultados do pré-teste e do pós-teste sobre as concepções da TRR (professores)	58
Tabela 4.2 Habilitações académicas	62
Tabela 4.3 Situação profissional	63
Tabela 4.4 Tempo de lecionação das disciplinas de Ciências Físico-Químicas, Física e Química A e Física de 12.º ano, ou disciplinas equivalentes.	63
Tabela 4.5 Tempo de serviço em 31 de agosto de 2013.....	63
Tabela 4.6 Avaliação global da proposta didática (1 discorda totalmente, 10 concorda totalmente)	64
Tabela 4.7 Avaliação da abordagem da experiência de Michelson-Morley (1 discorda totalmente, 10 concorda totalmente)	65
Tabela 4.8 Avaliação da abordagem da simultaneidade (1 discorda totalmente, 10 concorda totalmente)	66
Tabela 4.9 Avaliação da abordagem da dilatação do tempo (1 discorda totalmente, 10 concorda totalmente).....	67
Tabela 4.10 Avaliação da abordagem da contração do espaço (1 discorda totalmente, 10 concorda totalmente).....	68
Tabela 4.11 Avaliação da importância da aprendizagem da TRR no ensino secundário (1 discorda totalmente, 10 concorda totalmente)	69
Tabela 4.12 Dificuldades na lecionação da TRR	70
Tabela 4.13 Materiais utilizados para planificar as aulas e, ou, como recurso nas aulas	71
Tabela 4.14 Resultados do teste sobre as concepções da TRR (alunos)	75
Tabela 4.15 Quadro síntese dos resultados dos testes sobre as concepções da TRR dos professores (9) e dos alunos (8).....	79
Tabela 4.16 Resultados do questionário aos alunos sobre a TRR	80

Lista de abreviaturas e siglas

AAAS — American Association for the Advancement of Science

BSCS — Biological Science Curriculum Study

CBA — Chemical Bond Approach

CTS — Ciência, Tecnologia e Sociedade

CTSA — Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente

HFC — História e Filosofia das Ciências

pdf — Portable Document Format

PE — Pensamento espontâneo

ppt — Documento Power Point

PSSC — Physical Science Study Committee

RG — Relatividade galileana

SMSG — Science Mathematics Study Group

TAS — Teoria da Aprendizagem Significativa

TIC — Tecnologias de Informação e Comunicação

TRR — Teoria da Relatividade Restrita

1 Introdução

1.1 Porquê ensinar a Teoria da Relatividade Restrita?

Atualmente a visão epistemológica predominante do conhecimento humano é a de uma construção social, histórica e cultural. Para aprender e desenvolver-se cognitivamente, o indivíduo deve apropriar-se dessa construção através de uma reconstrução interna, passando a compartilhar significados aceites no seu meio sociocultural e, eventualmente, contribuindo para a construção de novos significados. Assim, a formação para a cidadania, implica o acesso democrático a essa construção e isso dá-se em grande parte através da escolarização. A ciência é, sem dúvida, um dos mais claros e bem sucedidos exemplos de construção do conhecimento humano, por isso, o cidadão deve ter acesso a esse conhecimento.

A essência da ciência em geral é a observação e a exploração do mundo em torno de nós com o objetivo de identificar alguma ordem subjacente ou padrão. A física é a parte da ciência que lida principalmente com o mundo inanimado e que, além disso, está preocupada com a tentativa de identificar os princípios fundamentais e unificadores do universo (French, 1998). A física tem desempenhado um papel fundamental no desenvolvimento científico e tecnológico, não só pela ajuda que tem prestado às outras ciências, como a biologia e a química, mas também porque a sua formulação se baseia na linguagem matemática, que é precisa e exata, fornecendo métodos poderosíssimos que permitiram enormes avanços ao longo dos séculos.

Mas como se constrói o conhecimento científico? Essencialmente, os cientistas criam modelos para explicar o mundo. A relação entre o modelo e o mundo não é uma relação de verdade, ela deve ser descrita como um grau de ajuste do modelo a um domínio particular do mundo real (Giere, 1989; 2004). Também se deve ter em conta que os cientistas, enquanto indivíduos, tomam decisões no que respeita aos modelos que melhor o representam e que estão causalmente ligadas a este, através da experimentação e de outras formas de interação. As ligações de tipo causal estão longe de ser perfeitas e as decisões estão sujeitas a variadas influências que se somam aos resultados das experiências. Contudo, em média os modelos que melhor se ajustam têm uma maior probabilidade de virem a ser eventualmente escolhidos pela comunidade de investigação. A ciência discute as representações das coisas, não as coisas em si (Giere, 1989). A ciência é, assim, um processo de representação do mundo, sempre sujeito a reformulação. A linguagem matemática desempenha um papel fundamental nesta representação, que não pode ser confundida com explicação. Mas o que significa explicar em ciência? “Para um físico, um determinado acontecimento está *explicado* no momento em que fica demonstrado que é uma consequência lógica de uma lei em que há razão para acreditar. Por outras palavras, um físico que acredita numa lei geral *explica*

uma observação mostrando que ela é consistente com essa lei” (Holton, Rutherford, & Watson, 1978, p. 70).

Recentemente, a ciência computacional – a aplicação de técnicas numéricas e computacionais para a resolução de problemas científicos – tem sido utilizada como uma nova metodologia na pesquisa científica. Neste processo, um problema científico (aplicação) é identificado e expresso em termos matemáticos, criando um modelo matemático, cujo algoritmo é expresso num código computacional e submetido a alguma plataforma computacional (arquitetura). O resultado deste ciclo pode ser um grande conjunto de dados, uma imagem ou uma animação, que são utilizados para entender um determinado problema científico. Normalmente, a solução requer refinamentos que são feitos computacionalmente ou em laboratório. A Figura 1.1 além de expressar a relação entre a aplicação (ciência), o algoritmo (matemática) e a arquitetura (computação) que permite fazer ciência ou engenharia num computador, também evidência a computação intimamente relacionada com a experimentação e a teoria, na construção da ciência (Shodor Education Foundation, 2005).



Figura 1.1 Relação entre a computação, a experimentação e a teoria na construção do conhecimento científico (Shodor Education Foundation, 2005).

É de realçar, que os cientistas, nas comunicações dos resultados das suas pesquisas, utilizam um discurso retórico que oculta a influência social na construção do conhecimento, criando uma imagem distorcida de como a ciência é construída (Sharma & Anderson, 2009). O processo é muito mais subtil e exigente do que a ideia ingênua de fazer um grande número de observações cuidadosas e depois organizá-las; é muito mais flexível do que a sequência rígida de etapas descritas nos manuais sobre o método científico; é muito mais do que fazer experiências e não se limita ao laboratório (American Association for the Advancement of Science, 1993).

Nos últimos anos, muitos resultados da pesquisa em educação têm mostrado que o processo de aprendizagem é efetivamente melhorado quando os alunos estão envolvidos nas atividades de

aprendizagem, como os cientistas estão envolvidos na investigação. Neste contexto, é essencial a integração precoce da computação de uma forma, que seja equilibrada com a teoria e a experimentação. Só assim, os processos ensino e aprendizagem podem estar de acordo com a investigação científica atual, e com o rápido desenvolvimento paralelo da tecnologia (Teodoro & Neves, 2011).

A decisão de escolher a Teoria da Relatividade Restrita (TRR) como tema deste trabalho baseou-se, fundamentalmente, no *interesse* demonstrado pelos alunos ao longo de vários anos em que lecionei este assunto e que é uma das condições, segundo Ausubel, para a aprendizagem ser significativa (Ausubel, 2003).

A TRR, apresentada em 1905, por Einstein, colocou em causa a mecânica newtoniana e revolucionou o pensamento científico de tal forma que é considerada um marco histórico, assinalando o início de um novo espírito científico ao *deformar* conceitos primordiais que eram tidos como adquiridos para sempre (Bachelard, 2005). A importância e a riqueza deste tema permitem discutir com os alunos o papel da comunidade científica na construção das teorias e mostrar que o conhecimento científico não é imutável e, sim, uma construção humana que está sujeita a contestações e modificações. Por outro lado, o facto de a sua divulgação romper as barreiras da comunidade científica, tornando-se conhecida pela sociedade e influenciando uma grande parte das produções culturais do século XX, faz com que este tema contribua para a formação de um cidadão capaz de compreender as novas produções científicas, entendendo minimamente as informações que lhe chegam através dos meios de comunicação.

A TRR é uma teoria coerente e aparentemente simples, inicialmente pouco plausível devido à natureza não intuitiva dos seus postulados e das suas principais consequências (dilatação de intervalos de tempo e contração de distâncias) e ao compromisso com certas ideias, como a visão mecânica do mundo ou o movimento absoluto. Vários estudos ao longo dos anos revelam que existe uma resistência dos alunos a aceitarem os seus princípios, sugerindo que estes interpretam os conceitos mais com o pensamento espontâneo do que de acordo com os conceitos relativistas. No entanto, a maioria dos alunos acaba por conviver com este desajuste entre os resultados da teoria e os seus pré-conceitos (Villani & Arruda, 1998).

As dificuldades não se prendem apenas com a aprendizagem da TRR, mas também com o seu ensino. As decisões didáticas e metodológicas escolhidas pelos professores na preparação das suas aulas são fundamentais para o ensino e a aprendizagem da TRR. Vários estudos revelam, que os professores têm dificuldades de várias ordens, incluindo conceptuais (Berenguer, 1997), sendo uma das razões a pouca, ou nenhuma, formação neste tema, e que as suas decisões metodológicas se baseiam no seguimento do livro de texto (Arriasecq, 2008; Arriasecq & Greca, 2004; Pérez & Solbes, 2003).

Relativamente a Portugal, existem poucos estudos sobre a TRR. Um inquérito realizado a professores, antes da entrada em vigor do novo programa da disciplina de Física lecionada no 12.º ano e que inclui a

TRR, concluiu que os professores: (a) estão mal preparados cientificamente para a lecionar, apesar de considerarem um assunto muito motivador e interessante; (b) reconhecem que se trata de um tema que tem uma forte contribuição para a literacia científica dos alunos, que acrescentaria algo à física estudada, tendo um forte interesse cultural, uma componente motivadora e que se enquadra numa perspetiva Ciência-Tecnologia-Sociedade-Ambiente (Valadares, 2005). Desde a implementação da TRR no 12.º ano pouca investigação tem sido feita. Suspeitamos que os poucos professores que ainda lecionam a disciplina de Física do 12.º ano, o façam seguindo o manual escolar, como o verificado em outros países, e que as suas dificuldades não foram superadas.

Face ao exposto consideramos pertinente a realização de um trabalho desta natureza, que permita a familiarização dos alunos e dos professores com um tema da ciência atual.

1.2 Objetivos do estudo e questões de investigação

Como objetivo geral deste trabalho pretende-se contribuir para um melhor ensino-aprendizagem da física em Portugal, através da elaboração de uma proposta didática do ensino da Teoria da Relatividade Restrita.

Para operacionalizar este objetivo geral, pretende-se:

- Detetar as dificuldades mais frequentes, de natureza científica e pedagógica, apresentadas pelos professores;
- Identificar dificuldades conceptuais nos professores e nos alunos;
- Identificar o tipo de recursos pedagógicos mais usados pelos professores durante a preparação e execução das aulas;
- Avaliar o interesse dos alunos e dos professores sobre o tema TRR;
- Delinear uma proposta curricular para o ensino da TRR, identificando estratégias que encorajem a aprendizagem significativa, utilizando, entre outros itens, exemplos de modelação computacional.

A questão central desta investigação que esteve sempre presente neste trabalho é:

- Que estrutura curricular é adequada para favorecer a aprendizagem significativa da TRR?

Para operacionalizar esta questão investigativa, consideramos mais quatro subquestões:

- Quais são as conceções dos professores e dos alunos, sobre os aspectos essenciais da TRR?
- Quais são as principais dificuldades dos professores e dos alunos?
- Quais são os materiais que os professores utilizam na preparação das aulas?
- Qual é a importância da aprendizagem da TRR no ensino secundário?

1.3 Estrutura da tese

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos. Iniciamos o estudo com uma breve introdução onde justificamos a escolha do tema, definimos os objetivos e as questões de investigação. De seguida, no capítulo dois, apresentamos uma revisão da literatura sobre o ensino e a aprendizagem da Teoria da Relatividade Restrita.

No capítulo três, fundamentamos e descrevemos a proposta didática que elaboramos sobre a Teoria da Relatividade Restrita.

No capítulo quatro, apresentamos os estudos empíricos realizados com professores e alunos. Descrevemos a metodologia adotada, os instrumentos de investigação desenvolvidos, os participantes nos estudos, os resultados, a análise dos resultados e algumas conclusões.

No capítulo cinco, são apresentadas as principais conclusões do estudo e as suas limitações, assim como algumas sugestões para futuras investigações.

2 Revisão da literatura sobre o ensino e a aprendizagem da TRR

2.1 Um olhar sobre a história das ideias e as suas implicações no ensino das ciências

2.1.1 História das ideias e o ensino das ciências

As raízes da ciência moderna encontram-se na cultura da Grécia antiga, na criação do primeiro sistema lógico — a geometria de Euclides.

“We honour ancient Greece as the cradle of western science. She for the first time created the intellectual miracle of a logical system, the assertions of which followed one from another with such rigor that not one of the demonstrated propositions admitted of the slightest doubt — Euclid's geometry.” (Einstein, 1934, p. 164)

Mas só no século XVII, com Kepler e Galileo, se conseguiu atingir uma ciência caracterizada pelo pensamento racional e por métodos que conduziram com sucesso à compreensão dos fenómenos naturais. Atualmente é consensual apontar 1609 como o ano do nascimento da física moderna, quando Galileo Galilei dirigiu pela primeira vez a sua luneta em direção à Lua. O caminho estava aberto para a observação direta do universo e obtenção da prova experimental de que o modelo heliocêntrico de Nicolas Copernicus devia substituir o velho modelo geocêntrico de Ptolomeu de Alexandria (Calado, 2011). Para a ciência é fundamental a experimentação como teste do conhecimento científico; citando Feynman:

“Experiment is the *sole judge* of scientific "truth." But what is the source of knowledge? Where do the laws that are to be tested come from? Experiment, itself, helps to produce these laws, in the sense that it gives us hints. But also needed is *imagination* to create from these hints the great generalizations—to guess at the wonderful, simple, but very strange patterns beneath them all, and then to experiment to check again whether we have made the right guess. This imagining process is so difficult that there is a division of labor in physics: there are *theoretical* physicists who imagine, deduce, and guess at new laws, but do not experiment; and then there are *experimental* physicists who experiment, imagine, deduce, and guess.” (Feynman, Leighton, & Sands, 1963, p. 1)

Neste trecho, Feynman também faz a divisão do trabalho na física pelos físicos teóricos e os físicos experimentais e refere ainda, a imaginação destes como algo muito importante na criação das leis da natureza. No entanto, estas grandes generalizações são apenas aproximações da verdade “because we know that we do not know all the laws as yet.” (Feynman, 1963, p. 1), e como já foi referido, nem sempre

foram, ou são, as mais adequadas; elas evoluíram, modificaram-se, foram sujeitas a contestações ao longo destes últimos quatrocentos anos.

Também é muito importante referir a evolução da forma como os físicos se exprimem: eles têm uma linguagem própria e pouco familiar fora do contexto científico; é como se tivéssemos de aprender uma nova linguagem para os compreender, mas não é uma questão de aprender um segundo idioma, de saber a estrutura da gramática de uma língua, é essencialmente, uma questão de familiarização com a linguagem e sua adequada utilização em contextos específicos. Citando Teodoro, Schwartz e Neves:

“learning science, and physics in particular, is like learning a new language – a language that uses many of the same words as ordinary language but with altered and far more precise meanings ... It is, essentially, a matter of *familiarization* with the lexicon of the language and its proper use in specific contexts. *Familiarization* is an important issue when learning science (and mathematics)” (Teodoro, Schwartz, & Neves, 2012, p. 573)

Na história da ciência é fácil encontrar cientistas de renome que também tiveram dificuldade em se familiarizarem com as novas ideias. Por exemplo, Henry Poincaré, assim como os físicos da sua época, acreditavam que as radiações eletromagnéticas se propagavam num meio chamado *éter*. Em 1900, no congresso de Paris afirmou:

“Et notre éther, existe-t-il réellement? On sait d’où nous vient la croyance à l’éther. Si la lumière nous arrive d’une étoile éloignée, pendant plusieurs années, elle n’est plus sur l’étoile et elle n’est pas encore sur la Terre, il faut bien qu’alors elle soit quelque part et soutenue, pour ainsi dire, par quelque support matériel.” (Poincaré, 1900, p. 21)

Estamos-nos a referir a um dos físicos precursor da cinemática relativista de Einstein, mas que nunca compreendeu, ou nunca aceitou, a Teoria da Relatividade Restrita (Pais, 1993). Numa visão mais radical, Planck considera na sua autobiografia, que as novas ideias triunfam porque os seus oponentes morrem:

“A new scientific truth does not triumph by convincing its opponents and making them see the light, but rather because its opponents eventually die, and a new generation grows up that is familiar with it.” (Planck, 1950, pp. 33-34).

A física é um assunto relativamente novo no currículo do ensino básico e secundário. O ensino em ciências surgiu na segunda metade do século XIX e a física, como disciplina autónoma, no século XX. A partir da Segunda Guerra Mundial nas sociedades mais industrializadas a ciência e a tecnologia foram reconhecidas como ferramentas importantes para o desenvolvimento económico, defesa nacional, social e outros interesses do estado, pelo que o ensino das ciências também foi influenciado nos diferentes níveis de ensino. Após o lançamento do Sputnik pelos soviéticos em 1957, os Estados Unidos, para ganharem a corrida espacial, fizeram grandes investimentos no ensino das ciências envolvendo sociedades científicas,

universidades e acadêmicos de renome, originando os chamados projetos de primeira geração do ensino da física (Physical Science Study Committee — PSSC), da química (Chemical Bond Approach — CBA), da biologia (Biological Science Curriculum Study — BSCS) e da matemática (Science Mathematics Study Group — SMSG) para o ensino secundário, com o objetivo principal de incentivarem os jovens a seguir carreiras científicas. No Reino Unido também foram elaborados projetos Nuffield no ensino da física, da química e da biologia (Jenkins, 1991). Estes projetos foram usados em todo o mundo com múltiplas traduções, sendo o PSSC o livro de ciência mais utilizado:

“With its multiple translations, it was the most utilised science textbook in history. It was the MacDonald’s or Coca-Cola of education” (Matthews, 2015, p. 63).

Os currículos de ciências tornaram-se progressivamente mais acadêmicos e profissionais dando ênfase à visão empirista da ciência. Segundo Matthews (2015), bastava apenas um pouco de história e filosofia das ciências (HFC) e poder-se-ia ter corrigido esse erro: “science does not proceed by induction, nor does it seek to verify its claims; more modestly, it seeks to confirm them.” (Matthews, 2015, p. 65)

No entanto, existem pelo menos duas importantes exceções, o Projeto de Física de Harvard e o BSCS. O Projeto Física foi construído em princípios históricos e preocupado com as dimensões cultural e filosófica da ciência. O seu sucesso em reter dos alunos, atrair mulheres para os cursos de ciências, desenvolver o raciocínio crítico e elevar a média dos resultados das avaliações forneceu evidências suficientes a favor da introdução da história e filosofia das ciências nos currículos. Os fracassos do projeto foram igualmente úteis, especialmente as que ocorreram do insucesso em levar, apropriadamente, a HFC ao conhecimento dos professores para que pudessem lidar com o currículo de maneira aberta e crítica, como se desejava. (Matthews, 1992)

Na década de 1980, inúmeros relatórios apontavam para um fracasso no movimento da reforma curricular no ensino das ciências, várias causas, entre as quais o corte de verbas, a logística inadequada de apoio aos professores e a inadequada formação de professores. Em 1985, a Associação Americana para o Progresso da Ciência (AAAS) lançou, um amplo estudo a fim de rever integralmente o ensino de ciências na escola (Projeto 2061). Em 1989, após quatro anos de debates e considerações, suas recomendações foram publicadas num relatório intitulado “Ciências para todos os americanos”. O Projeto 2061 demonstra uma certa convergência de ideais com outros projetos, em relação à necessidade de que os cursos de ciências devem ser mais contextualizados, mais históricos e mais filosóficos ou reflexivos.

Segundo Matthews (2015), tendo em conta as lições aprendidas das reformas curriculares dos anos 1960, da crise das ciências da educação da década de 1980 e da melhor compreensão de como as crianças aprendem ciência, os projetos curriculares na maior parte do mundo estão atualmente a tentar incorporar as seguintes ideias:

- Devem ser ensinados menos conteúdos, mas de forma a que incentive a compreensão em vez da memorização;
- Algumas relações entre a ciência, a tecnologia e a sociedade devem ser analisadas;
- As dimensões culturais da ciência, a sua história e filosofia, suas implicações morais e religiosas, precisam de ser consideradas; um curso de ciências deve implicar alguma aprendizagem sobre ciência, bem como a aprendizagem da ciência;
- Uma mudança curricular só será eficaz se for acompanhada por mudanças sistemáticas envolvendo a formação de professores ou programas de reeducação, financiamento e sistemas de avaliação.

Os projetos PRIMAS¹, Pollen², Sinus-Transfer³ and Fibonacci⁴ são alguns exemplos dos inúmeros projetos existentes (Matthews, 2015).

2.1.2 História das ideias relacionada com a TRR

No Projeto 2061 — Science for All Americans, a relatividade é uma das “dez descobertas” identificadas no capítulo dez, “Perspetivas históricas”, por ser um tema histórico que exemplifica a evolução e o impacto do conhecimento científico e com significado cultural (Rutherford & Ahlgren, 1995). No entanto é necessário ter cuidado na forma de a abordar. Se partirmos dos dois postulados de Einstein, transmitiremos aos alunos uma visão epistemológica racionalista que está longe de corresponder à construção das ideias históricas que permitiram os seus enunciados. Se partirmos da experiência de Michelson-Morley, corremos o risco de os alunos ficarem com uma visão empirista da construção dessa teoria. Mas se a abordagem for histórica e recuar no caudal de ideias que contribuíram para a TRR, daremos uma visão epistemologicamente e até humanamente muito mais correta da ciência (Valadares, 2012) e ajuda-nos a que os alunos encararem as dificuldades conceptuais com mais facilidade pois “se grandes cientistas tiveram concepções incorretas e assumiram, por vezes, atitudes dogmáticas, será de estranhar que o mesmo suceda com alunos e professores?” (Valadares, 1995, p. 20).

Einstein, assim como Galileo Galilei, recorreu a *experiências imaginadas* — *gedankenexperiments*, para explicar a sua teoria. A primeira experiência conceptual de Einstein foi criada quando ele tinha cerca de dezasseis anos. Ele imaginava que, se viajasse na crista de uma onda de luz, à velocidade da luz, algo

¹ Este projeto pode ser consultado em www.primas-project.eu

² Este projeto pode ser consultado em <https://globalpollenproject.org>

³ Este projeto pode ser consultado em www.sinus-transfer.eu

⁴ Este projeto pode ser consultado em <http://www.projectfibonacci.org>

estranho aconteceria: encontraria um campo de ondas independente do tempo. Einstein desde cedo colocava questões desafiando o que era óbvio e a partir destas questões fundamentais, repensou o mundo, revolucionando a física (Pais, 1993; Sagan, 1984).

Sobre a TRR Einstein escreveu:

“Ao tratar do objeto particular da teoria da relatividade, faço questão de esclarecer que esta teoria não tem fundamento especulativo, mas que sua descoberta se baseia inteiramente na vontade perseverante de adaptar, do melhor modo possível, a teoria física aos fatos observados. Não há necessidade alguma de falar de ato ou de ação revolucionária, pois ela marca a evolução natural de uma linha seguida há séculos. A rejeição de certas concepções sobre o espaço, o tempo e o movimento, concepções julgadas fundamentais até esse momento, não, não foi um ato arbitrário, mas simplesmente um ato exigido pelos factos observados” (Einstein, 1981, p. 65).

2.2 Dificuldades conceptuais em ciência: Uma introdução

Segundo Anna Sfard (1998), desde o tempo de Piaget e de Vygotsky que a aquisição do conhecimento no processo de aprendizagem tem sido analisado em termos de desenvolvimento de conceitos. Os *conceitos* são considerados como unidades básicas de conhecimento que podem ser acumulados, gradualmente refinados, e combinados para formarem estruturas cognitivas cada vez mais ricas.

Sobre os conceitos dos alunos e a aprendizagem conceptual em ciência, Piaget descreveu um processo de aprendizagem em que o indivíduo faz sentido do mundo à sua volta através de esquemas cognitivos (*schemata*) que vai construindo e modificando como resultado das suas ações individuais sobre o mundo, que pode ser resumido pela sua frase célebre “L’intelligence organise le monde en s’organisant elle-même”. O mecanismo proposto para as transformações da organização intelectual (estrutura cognitiva) como resultado de interações com o mundo, chamado de *adaptação*, envolve os processos de *assimilação* e *acomodação*. A *assimilação* é o processo pelo qual o indivíduo incorpora todos os dados da experiência aos seus esquemas anteriores. A *acomodação* é o processo pelo qual a estrutura cognitiva se adapta aos novos dados para dar sentido a informações específicas. A *assimilação* e a *acomodação* não podem ser dissociadas, sempre que um indivíduo interage com a informação sensorial, tanto a *assimilação* como a *acomodação* têm lugar. Resumindo, a *adaptação* é uma *equilibração* progressiva entre um mecanismo assimilador e uma *acomodação* complementar (Piaget, 1965).

“Si nous appelons *accommodation* ce résultat des pressions exercées par le milieu ... nous pouvons donc dire que *l’adaptation est un équilibre entre l’assimilation et l’accommodation*” (Piaget, 1977, p. 12).

O principal interesse de Piaget era o desenvolvimento como resultado da maturação, em vez da aprendizagem como resultado da instrução. O trabalho empírico focou-se no desenvolvimento do conhecimento das crianças sobre alguns aspectos do mundo como a vida, o tempo, a massa, o peso e o volume. Baseado neste trabalho empírico propôs estádios característicos do desenvolvimento da criança. Para Piaget, a aprendizagem é função do desenvolvimento. As ideias de Piaget dominaram os anos 60 e 70, influenciando as perspectivas sobre as concepções dos alunos e a aprendizagem conceptual e, apesar de várias críticas, talvez a mais importante para quebrar a influência das teorias piagetianas, tenha sido a teoria da aprendizagem de David Ausubel (Leach & Scott, 2010).

Para Ausubel, a aquisição e a retenção de conhecimentos são o produto de um processo ativo integrador e interativo entre o material de instrução e as ideias relevantes da estrutura cognitiva do aprendiz, sendo o fator determinante do processo de aprendizagem o conhecimento e as competências que o indivíduo já possui (Ausubel, 2003).

No início dos anos 70, começaram a surgir estudos empíricos para analisar a estrutura do conhecimento dos alunos, relativos à aprendizagem científica em que estes explicavam os fenómenos por raciocínios cientificamente incorretos, as chamadas concepções alternativas como, por exemplo, os trabalhos empíricos de Viennot (1979). Nos anos seguintes, desenvolveram-se programas de pesquisa, envolvendo investigadores de todo o mundo, focados na investigação das concepções alternativas dos alunos em ciência. Estes estudos indicavam que estas concepções podiam diferir substancialmente do que era ensinado, podendo influenciar a aprendizagem e serem fortemente resistentes à mudança e também sugeriam a existência de fortes semelhanças nas concepções alternativas de estudantes de diferentes culturas (Driver, 1989). Pfundt e Duit (2009) compilaram uma vasta bibliografia de estudos realizados sobre concepções alternativas.

Na literatura aparecem muitos termos relacionados com as concepções dos alunos sobre a ciência como, por exemplo, crenças ingénuas (“naïve beliefs”), ideias erróneas, preconcepções, versões particulares da ciência, concepções alternativas e muitos outros. Abimbola, em 1988, fez um estudo sobre a terminologia destas concepções e considerou que o termo *concepção alternativa* é suficientemente geral para ser usado pelos investigadores das ciências da educação para explicar diferentes aspectos das concepções dos aprendizes (Abimbola, 1988). A Enciclopédia da Ciência da Educação refere que são termos sinónimos:

“These ideas have been described using a wide range of terms, including misconceptions, preconceptions, alternative conceptions, alternative frameworks, alternative conceptual frameworks, intuitive theories, and mini-theories. Sometimes particular authors distinguish between meanings for some of these terms, but usage varies across the literature so often the different labels are, in effect, broad synonyms” (Taber, 2015, p. 37).

2.3 Dificuldades do ensino e da aprendizagem na TRR

Existem poucos trabalhos de investigação realizados sobre a TRR, comparativamente com os existentes em outras áreas da física, nomeadamente com a relatividade de Galileu (Selçuk, 2011). Os trabalhos identificados podem ser divididos em duas grandes categorias: os que estudam conceitos relacionados com a TRR e os que implementam propostas didáticas em sala de aula, sustentados em diferentes quadros teóricos (Arriasecq, 2008).

2.3.1 Dificuldades conceituais na TRR

Dos estudos que evidenciam dificuldades conceituais nos alunos do secundário e ensino superior, alunos formados em física e em professores, destacamos os trabalhos realizados por Posner, Strike, Hewson e Gertzog (1982), Hewson (1982), Villani e Pacca (1987), Valadares (1995), Scherr, Shaffer e Vokos (2001; 2002), Pérez e Solbes (2003), Hosson, Kermen e Parizot (2010) e Selçuk (2011).

Saltiel e Malgrange, 1980, Spontaneous ways of reasoning in elementary kinematics

Metodologia

Utilização de Entrevistas

Participantes

80 crianças de onze anos e 700 alunos universitários do primeiro ano e do quarto ano.

Conclusões do Estudo

Estudo realizado a crianças de onze anos e a alunos universitários para explorar e analisar o pensamento espontâneo em conceitos de cinemática elementar (movimento uniforme em referenciais de Galileu); as respostas certas e erradas variavam pouco nos dois grupos. Este resultado levou-os a admitir que não são consequência apenas da aprendizagem escolar, mas também de uma suposta existência de uma estrutura organizada que chamaram de “modelo natural”, em oposição ao modelo cinemático dos físicos. O movimento e a velocidade são considerados como propriedades físicas intrínsecas do corpo, independentes dos observadores, e tendem a ser explicados como causados por forças e não como quantidades que se medem em relação a um referencial. Os alunos consideram ainda dois tipos de movimento: o “real” ou o que é intrínseco porque tem uma causa conhecida (causados por uma força) e o “aparente” que é conhecido como uma ilusão de ótica (Saltiel & Malgrange, 1980).

Posner, Kenneth, Hewson e Gertzog, 1982, Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change

Metodologia

Entrevistas realizadas a estudantes universitários de física que tinham completado a unidade sobre TRR, e a professores de física, para investigar como mudam as concepções sob o impacto de novas ideias e novas evidências. Nas entrevistas, foram apresentados dois problemas aos entrevistados que foram solicitados a exprimirem o pensamento em voz alta durante a resolução e a justificar as suas respostas.

Participantes

Estudantes universitários de física, que tinham completado a unidade sobre a TRR, e a professores de física.

Conclusões do Estudo

Neste estudo identificaram “metaphysical beliefs” (p. 219), como por exemplo a crença do espaço e o tempo serem absolutos, que desempenham um papel importante no modo como entendem a TRR, podendo representar uma barreira para a compreensão de certos tópicos. Um dos exemplos referidos por Posner et al., foi o de um estudo de caso de um monitor de física, descrito com mais pormenor num artigo escrito por Hewson (1982) e relatado em seguida. Mencionaram ainda, que o modo como os professores clarificavam as ideias e apresentavam a informação não era adequada a ajudar os alunos na substituição e reorganização dos conceitos.

Hewson, 1982, A case study of conceptual change in special relativity: The influence of prior knowledge in learning

Metodologia

Este trabalho descreve um estudo de caso de um monitor (SL), de um curso inicial de física, consistindo em três entrevistas, em momentos diferentes. O objetivo da primeira entrevista foi determinar os compromissos metafísicos que tinha em relação à teoria da relatividade especial e mostrar o papel desses compromissos em relação à aceitação de aspectos contraintuitivos da teoria. A segunda entrevista, quatro meses depois, foi usada para mostrar a estabilidade dos seus compromissos e apresentar a metafísica subjacente à teoria em comparação com a sua própria. A terceira entrevista, dez dias mais tarde, repete partes da primeira e mostra as mudanças que ocorreram nos seus compromissos metafísicos.

Participantes

Monitor de um curso de iniciação de física.

Conclusões do Estudo

Inicialmente o entrevistado mostra que tem compromissos metafísicos com uma visão mecanicista do mundo em que os objetos têm propriedades fixas (como o comprimento) e que as explicações dos fenómenos relativistas devem ser em termos desses objetos e das suas interações.

(SL) I see them as being – as changing their length, or changing their time. But I can talk to the person who's moving at the same velocity as the stick and the clock. He's telling me that they don't change ... *I feel they haven't changed, but the way I'm looking at them has changed* ... I guess I'm allowing for the fact that a person who's seeing these things at rest, who has his clock at rest, his meter stick at rest, has ... a little more *right* to say what is *really happening* to the sticks.

A little later he continues:

(SL) But I'm not all uncomfortable with the idea for foreshortening. I do say, I do feel it is a *perception*. I will say it is a shortening. I know in the back of my mind that my friend who's riding along with that meter stick is telling me all the time that as far as he can tell, it's the same length and I believe what he's saying which is OK.

(I) it's not a conflict?

(SL) No, because the fact that it's moving makes it *appear* to me as if it were foreshortened (p. 68).

Considera que o comprimento é constante independentemente do referencial. A contração do comprimento é simplesmente uma distorção da percepção, não ocorrendo na realidade.

Em relação à dilatação do tempo para qualquer relógio, pode ser explicada pela contração dos intervalos de tempo em relação aos relógios de luz.

(SL) It will be keeping the same time [as the moving light clock]. I haven't done anything to it that it shouldn't keep the same time. (p. 68)

(I) But now we've got a [clock] which has nothing whatsoever to do with light and so how can you explain the fact that it is running slower as well?

(SL) Well, that I can't do, but you — let's see, if you use another clock, well, like a human heartbeat is also a clock and in detail I can't explain why that would go slower ... but I have a little bit more of a feel that it depends on the speed of light. For instance, if you are sending ... your body runs by sending neural stimulation, up through your body ... those electrical phenomena ... well, it's a phenomenon which depends on light and electricity, then *I reason that those processes will be affected similar to a*

light clock and so I can more or less see how the heartbeat would slow down if it's moving at a high velocity.

Mais tarde refere:

(SL) I don't see how in depth I can argue for my clock on the basis of light, but I believe it can be done...

Na segunda entrevista, sobre a mesma questão

(SL) I don't like the idea of faith so much ... I think that physics works, can explain everything, and that's the premise I'm working on and so when I come up with something that I can't understand I would like to think it through and explain it to myself ... if someone just tells me well these mechanical clocks have to [run slower], that doesn't sit well with me because I can't see why they're telling me to take something on faith when I or they can't explain it.

(I) OK, so, I think that it comes down to what you would accept as a reasonable explanation of this phenomenon which we can agree about which is that a clock slows down. And what is, as far as you're concerned, a reasonable explanation of such a phenomenon has to do with being able to postulate some sort of process, a mechanism which makes things slow down?

(SL) Yes.

(I) And that underlying everything in the world there is this type of mechanism explanation?

(SL) Right.

Durante a intervenção houve uma alteração na natureza da explicação dos fenómenos (mudança conceptual, segundo o autor) percebendo que estes surgem do próprio processo e da criação de escalas adequadas, ou seja, uma alteração de explicações mecanicistas para relativistas. Segundo o autor, esta alteração foi causada pela insatisfação com a conceção existente ao mostrar que as conceções auxiliares (aparência das contrações e explicação da dilatação em função dos relógios de luz) eram desnecessárias, por outro lado, o entrevistado foi em parte forçado a considerar a TRR plausível para poder fazer parte da comunidade dos físicos.

Este estudo de caso mostra como as conceções existentes, que incluem compromissos metafísicos, desempenham um papel muito importante no modo como interpretam os conceitos mais complexos, tais como a TRR.

Villani e Pacca, 1987, Students' spontaneous ideas about the speed of light

Metodologia

Um grupo de estudantes de mestrado e de doutoramento em física participaram em entrevistas dirigidas utilizando duas situações-problema para estudar como os alunos graduados em física usam noções espontâneas na resolução qualitativa de dois problemas sobre a velocidade da luz.

Participantes

65 estudantes brasileiros graduados em física e a frequentar o mestrado ou o doutoramento em física.

Conclusões do estudo

A análise das respostas mostrou que apesar de existirem previsões corretas, estas eram acompanhadas de raciocínios incompletos ou misturados com noções espontâneas. No primeiro problema sobre distâncias era como se só existisse uma velocidade para a luz e para os comboios, e uma única distância percorrida independentemente da localização dos observadores. No segundo problema sobre o tempo, apareceu uma mistura de noções relativistas e espontâneas: as distâncias percorridas pela luz não dependiam do observador, a dilatação do tempo ocorria quando o objeto se movimentava “realmente”, as observações eram qualificadas de “reais” ou “aparentes”, dependendo da condição de repouso ou de movimento. Consideravam que as medidas eram diferentes “devido à relatividade”, mas tratavam-se apenas de efeitos aparentes. A distância, velocidade e tempo reais eram únicos, pois não dependiam dos observadores.

Segundo os autores (Villani & Pacca, 1987; 1990), as conclusões foram semelhantes às de Saltiel e Malgrange: a independência entre noções cinemáticas e sistema de referência; a utilização de um esquema tipo “arrastamento” para compor distâncias; as categorias do “real” e “aparente” para distinguir a visão do movimento verdadeiro das outras visões e, finalmente a noção de movimento relativo. Concluíram que as noções espontâneas permaneciam num estado latente na mente dos estudantes, reaparecendo quando a utilização em esquemas formais era menos imediata e os estudantes estavam inseguros. Também referiram que, ao examinar-se a história da Física, mesmo de uma forma superficial, encontrava-se a ideia de movimento semelhante à destes estudantes. Sugeriram a importância do estudo da história das ideias em Física, através do qual os estudantes podem tornar-se conscientes não só que a Física não é composta apenas de fórmulas matemáticas, mas também está perto da filosofia e da cultura do seu tempo.

Valadares, 1994, Pensamento espontâneo de professores do ensino secundário acerca da relatividade de grandezas mecânicas⁵

Metodologia

Este estudo consistiu na análise das respostas dos professores, participantes em dois cursos de formação de 12 horas, a 8 questões envolvendo três situações problema. As questões das duas primeiras situações problema são da autoria dos investigadores Villani & Pacca. As respostas foram analisadas procurando encontrar características típicas de raciocínios baseados na relatividade einsteiniana, relatividade galileana e “cinemática espontânea”.

Participantes

53 professores portugueses do ensino secundário

Conclusões do estudo

As características dos raciocínios baseados na relatividade einsteiniana, relatividade galileana e “cinemática espontânea” estão descritas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 Características típicas de raciocínios baseados na TRR, relatividade galileana e “cinemática espontânea”

Raciocínios baseados na relatividade einsteiniana	Raciocínios baseados na relatividade galileana	Raciocínios baseados numa “cinemática espontânea”
Uma escolha, em cada caso, de um referencial inercial conveniente e sem qualquer indício de privilégio concedido aos referenciais terrestres ou a quaisquer outros assumidos como referenciais absolutos;	Uma escolha, em cada caso, de um referencial inercial conveniente e sem qualquer indício de privilégio concedido aos referenciais terrestres, mas assumindo a existência de um referencial absoluto em que a luz tem a mesma velocidade todas as direções;	A não escolha de referencial com uma mais ou menos tácita adoção sistemática dos referenciais terrestres, ou de um referencial espacial considerado absoluto, como base do raciocínio, e onde se situa um observador privilegiado com acesso aos valores “reais”, “próprios”, “autênticos” ou “verdadeiros”;
A constância da velocidade da luz em todas as direções e em todos os referenciais e um assumir do seu carácter finito;	A constância da velocidade da luz em todas as direções no referencial absoluto e um não assumir do seu carácter finito;	Um não assumir do carácter finito da velocidade da luz;
A relatividade das restantes velocidades;	A relatividade de todas as velocidades nos referenciais móveis;	O adotar de uma velocidade como privilegiada, a «autêntica» ou «verdadeira», aquela que se refere ao espaço absoluto tacitamente adotado;
A relatividade dos intervalos de tempo,	A não relatividade dos intervalos de	A não relatividade dos intervalos de tempo;

⁵ Este artigo também se encontra como anexo da tese de doutoramento (J. Valadares, 1995)

com um aumento dos mesmos quando respeitantes a fenómenos observados em movimento;		tempo;
A relatividade das distâncias espaciais, com uma diminuição das mesmas quando observadas em movimento;	A não relatividade das distâncias espaciais;	A não relatividade das distâncias espaciais;
A relatividade das distâncias percorridas e, portanto, das trajetórias, decorrentes da relatividade das velocidades e/ou dos tempos de percurso;	A relatividade das distâncias percorridas e, portanto, das trajetórias, decorrentes da relatividade das velocidades mas não dos tempos de percurso;	A não relatividade das distâncias percorridas e, portanto, das trajetórias, antes privilegiando uma distância percorrida como “autêntica” ou “verdadeira” (no caso de se tornarem evidentes outras, estas são consideradas como o resultado de movimentos aparentes);

Os resultados mostraram que os professores portugueses revelaram o mesmo o mesmo tipo de raciocínio espontâneo que os estudantes brasileiros:

“Independentemente da sua experiência e da sua formação académica, também revelaram a presença de ideias espontâneas, as quais influenciam o modo como raciocinam perante situações menos familiares, principalmente quando não podem refugiar-se em formalismos matemáticos rotineiramente aplicados” (Valadares, 1995, p. 756).

Valadares propôs que a introdução da relatividade restrita nos currícula do ensino secundário deve ser precedida pela formação de professores na relatividade restrita e na relatividade galileana. As atividades relacionadas com a relatividade galileana, “discussão de diversas situações experimentais, reais e conceptuais, de movimento relativo, e recorrendo à modelação em computador” (p. 757), poderão ajudar os professores e os alunos a progressivamente a libertarem-se das ideias espontâneas, nomeadamente da velocidade absoluta e do espaço percorrido absoluto, só depois com a introdução dos conceitos da relatividade einsteiniana “os professores se irão libertando de outros esquemas alternativos tais como o valor infinito da velocidade da luz, das distâncias absolutas e do tempo absoluto” (p. 757).

Scherr, Shaffer e Vokos, 2001, Students understanding of time in special relativity: Simultaneity and reference frames

Metodologia

O principal objetivo desta investigação pretendia determinar a extensão em que os alunos, após instrução, eram capazes aplicar os conceitos da TRR a situações simples. A pesquisa foi realizada através da análise das respostas escritas a questões colocadas durante o curso, nuns grupos em situação de pré-teste e noutros em pós-teste, e ainda, através da análise de entrevistas individuais, para estudar o raciocínio dos alunos.

Participantes

Mais de 800 estudantes universitários norte-americanos, provenientes de diferentes cursos.

Conclusões do estudo

Uma das situações-problema envolvia dois vulcões (Mt. Rainier e Mt. Hood) que entravam em erupção simultaneamente para um observador terrestre, situado a meia distância entre os dois vulcões e uma nave espacial que se movia do Mt. Rainier para o Mt. Hood, com uma velocidade relativista. Quando os vulcões entravam em erupção a nave espacial estava sobre o Mt. Rainier. As questões colocadas aos alunos eram relativas à ordem da erupção dos vulcões para o referencial da nave espacial.

Analisando as respostas, muitos alunos admitiam que os eventos eram simultâneos se o observador recebesse os sinais dos eventos ao mesmo tempo, existia uma tendência em associar o tempo que um evento ocorria com o tempo em que o observador recebia o sinal do evento:

“The spacecraft is near Rainier, so he gets the signal about the same time Rainier erupts. So the spacecraft pilot would say Rainier erupts before Hood.” (graduate student)

“Mt. Rainier erupts first because the light from Mt. Hood takes time to reach the spaceship.” (introductory student)

Para investigar melhor o raciocínio dos alunos, estes foram informados de que observadores eram “observadores inteligentes”, ou seja, eles corrigiam o tempo de viagem do sinal, a fim de determinar o tempo dos acontecimentos no seu referencial. Nestas situações os alunos acreditavam que a simultaneidade era absoluta:

“If we are in relative motion we will measure different distances and so on but if we are all intelligent observers we will all figure out that the events were simultaneous in our rods-and-clocks reference frame.” (graduate student)

“There is no real difference between the spacecraft and the [observer on the ground under the spacecraft]. Because I said the signals reach [that observer] at different times, but he can determine at which times the signals were emitted. ...So I can do the same thing on the spacecraft: I might see the signals at different times but I can figure out that they happened at the same time.” (graduate student)

A crença na relatividade absoluta estava profundamente enraizada, qualquer aparência contrária era apenas aparências visuais devido a diferenças da recepção dos sinais provenientes dos eventos. Estas dificuldades foram evidenciadas na entrevista a um estudante graduado, S, que afirmava:

S: There are really two separate kinds of reference frames. There is the kind of reference frames with all those rods and clocks extending to infinity, like in [the textbook]. But in practice, nothing happens except right where you are. So really, your reference frame is something you carry around with you ...

I: There is this thing about simultaneity being relative, about events that are simultaneous in my reference frame not necessarily being simultaneous in another reference frame. Which kind of reference frame does that refer to?

S: Relativity of simultaneity is this local thing. It's not the rods and clocks thing, because if we are intelligent, we correct for that. It's this thing that if I see them at different times, they occurred at different times in my reference frame. (graduate student)

Noutra questão, para aprofundar a compreensão da simultaneidade, dos referenciais e o papel dos observadores, os alunos foram interrogados sobre a ordem das erupções dos vulcões para um sismólogo e o seu assistente (junto do Mt. Rainier). Vários erros mostraram a tendência a considerar os observadores em repouso como estando em referenciais diferentes. Nas entrevistas muitos alunos expressaram a opinião de que o referencial descrevia o que o observador percebia num determinado local. Por exemplo, um aluno graduado respondeu que:

“Within normal human ability to comprehend time, I would say that the eruptions are going to be at the same time. But if he's blind, he's going to hear Rainier for sure go off before Hood. And so he's going to say that Rainier went off before Hood because it's going to take much longer for the sound from Hood to get there.” (graduate student)

De seguida foi-lhe pedido para esboçar uns esquemas sobre as erupções no referencial dos sismólogos (Figura 2.1). Nesta representação o estudante indicou que a erupção dos dois vulcões era simultânea no referencial do sismólogo, mas no referencial do assistente, a erupção não era simultânea, Mt. Rainier entrava em erupção em primeiro lugar e só depois o Mt. Hood.

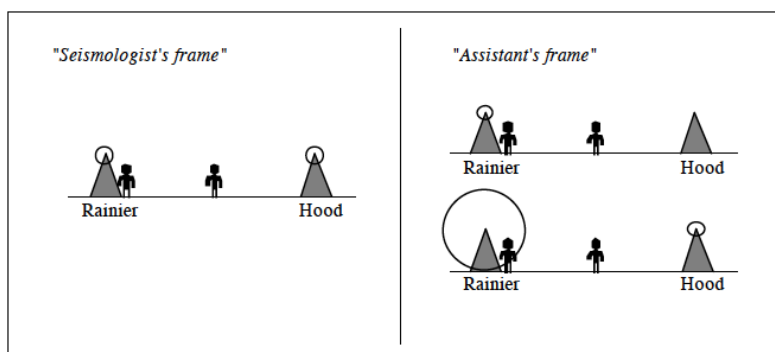


Figura 2.1 Resposta de um estudante graduado à questão sobre a ordem das erupções dos vulcões para um sismólogo, a meio dos dois vulcões, e o seu assistente, junto a Mt. Rainier (p. S34).

Concluindo, os estudantes apresentaram dificuldades na relatividade da simultaneidade e no papel do observador colocado no sistema inercial de referência. Muitos dos estudantes, incluindo graduados, não conseguiram determinar o tempo a que um evento ocorria, confundido o instante em que ocorreu o evento e o instante em que este evento era percebido por um observador, reconhecer a equivalência relativa dos observadores em repouso, ou no mesmo referencial, e aplicar a definição de simultaneidade. Os resultados sugeriram, que parte destes alunos construíam um quadro conceptual em que a simultaneidade absoluta e a relativa coexistiam.

Scherr, Shaffer e Vokos, 2002, The challenge of changing deeply-held student beliefs about the relativity of simultaneity

Metodologia

Neste estudo, os mesmos autores desenvolveram a investigação acima referida. Utilizaram tutoriais desenhados para complementar as palestras e os manuais de um curso tradicional e cuja ênfase estava na construção de conceitos, no desenvolvimento do raciocínio e em relacionar o formalismo da física com o mundo real. Os tutoriais foram aplicados depois da instrução tradicional e começaram com um pré-teste com questões qualitativas que requeriam a explicação dos raciocínios. Durante as sessões dos tutoriais os estudantes trabalharam colaborativamente em pequenos grupos numa série de questões sequenciais com o objetivo de orientar o raciocínio para desenvolver e aplicar determinado conceito. As atividades de trabalho de casa ajudaram os alunos a aplicar, a entender e a generalizar o que aprenderam. No final dos tutoriais, os alunos realizaram um pós-teste para avaliar as suas aprendizagens e orientar as modificações no currículo.

Participantes

Mais de 350 estudantes universitários norte-americanos, provenientes de diferentes cursos.

Conclusões do estudo

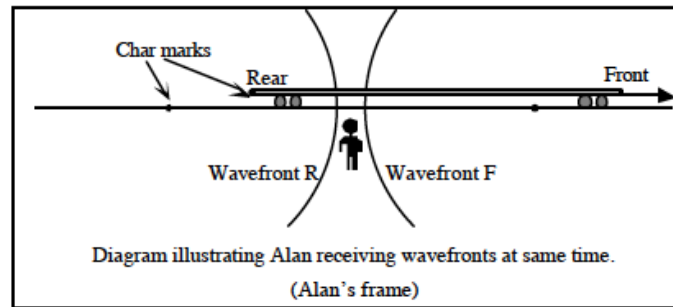
Os autores apresentaram dois tutoriais, um sobre eventos e referenciais e o outro sobre a simultaneidade. Os estudantes tinham duas horas para trabalhar com estes tutoriais.

O primeiro tutorial começava com um exercício que pedia aos alunos para descreverem dois procedimentos pelos quais um observador podia determinar o instante de tempo em que um aparelho emitia um sinal sonoro. Na primeira situação era conhecida a velocidade do som no ar, mas na segunda não. O objetivo era que os alunos compreendessem a natureza finita do sinal. Em outro exercício os alunos generalizaram o tempo de um evento e introduziram o termo referencial para um sistema de observadores. De seguida, os alunos usaram os conceitos de referencial e a definição de tempo para concluir se os

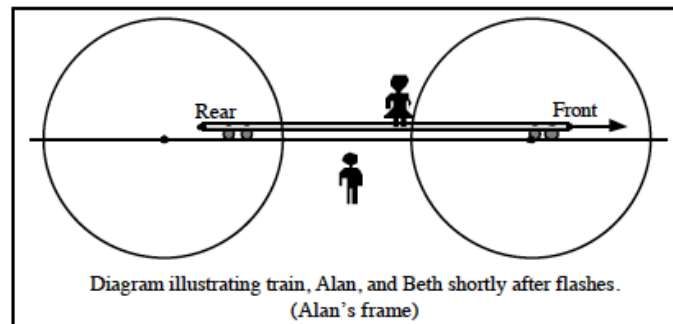
sinais sonoros chegavam ao observador simultaneamente, o evento mais distante ocorria em primeiro lugar. Estes exercícios ajudavam os alunos a perceber que a simultaneidade dos eventos não se refere à simultaneidade da recepção dos sinais gerados por aqueles eventos, mas sim para uma comparação das coordenadas dos tempos dos eventos medidos por um sistema de observadores inteligentes. No entanto, os pós-testes sugeriram que estas atividades foram necessárias mas não suficientes para superar as dificuldades do papel dos observadores nos referenciais.

No segundo tutorial os estudantes examinaram a consequência da invariância da velocidade da luz através da análise do paradoxo do comboio. Primeiro com uma situação de um flash de luz e dois referenciais, o referencial Terra e o referencial comboio em movimento com velocidade constante em relação ao referencial Terra. A seguir com dois flashes de luz e dois referenciais, Terra e comboio, em que dois relâmpagos atingem as extremidades do comboio em movimento com velocidade constante em relação à Terra. De acordo com o observador em repouso na Terra (Alan) os relâmpagos ocorrem ao mesmo tempo (Figura 2.2 (a)). Alan observa que o comboio está a mover-se em direção à origem de um dos flashes, o que leva a concluir que os flashes chegam ao centro do comboio, onde se encontra a Beth, em tempos diferentes (Figura 2.2 (b)). O Alan imagina o que ocorre no referencial do comboio, considerando-o parado. Sabendo que a propagação da luz é isotrópica em todos os referenciais e a Beth está no centro à mesma distância das extremidades do comboio, irá observar os dois feixes ao mesmo tempo. Assim as previsões sobre a ordem nos dois referenciais parecem ser diferentes. A resolução deste paradoxo é considerar que no referencial do comboio os eventos não são simultâneos. Primeiro ocorre o relâmpago na parte da frente do comboio e a seguir o outro, assim não chegam em simultâneo ao centro do comboio. A ordem é igual em todos os referenciais. A observação em sala de aula indicou que a resolução do paradoxo é muito difícil para os alunos. Facilmente conseguem interpretar o que ocorre no referencial do comboio a partir do referencial da Terra, mas respondem incorretamente no referencial da Beth dizendo que ocorre ao mesmo tempo. Pouquíssimos alunos reconhecem a inconsistência das duas repostas. Não reconhecem a relatividade da simultaneidade e não confrontam com as suas crenças de que a relatividade é absoluta. Não reconhecem que a ordem dos acontecimentos tem de ser a mesma em todos os referenciais e que é uma consequência da causalidade (o resultado não pode preceder a causa).

Modificaram o tutorial, dizendo que a Beth tinha um aparelho de música, quando a onda F atinge a Beth (ou o aparelho) ele toca com o volume no máximo, quando a onda R atinge o aparelho, ele fica em silêncio. Questionou-se os alunos quando o aparelho toca no referencial do Alan e no referencial da Beth. Descobriram que este tipo de exercício ajuda os alunos a confrontar o paradoxo. Alguns alunos ainda tiveram dificuldade em resolvê-lo.



(a)



(b)

Figura 2.2 Diagramas do paradoxo do comboio para o observador no referencial Terra (p. 1241). (a) Diagrama dado aos estudantes, em que o observador na Terra está no centro das marcas deixadas pelos 2 flashes. (b) Exemplo de um diagrama desenhado por um estudante que ilustra como o Alan (referencial Terra) observa os flashes a atingirem a Beth (referencial comboio).

O exemplo que se segue mostra o dialogo entre três estudantes universitários em sala de aula:

S1: We just figured out that the tape player plays in Alan's frame.

S2: But it can't. In Beth's frame they [the wavefronts] hit her at the same time. So she won't hear it.

S3: But look down here, it's asking if she hears it and if the tape will have wound from its starting position. If the tape is going to play, that's it; it's going to play.

S2: But it can't play for Beth! She's in the middle. They hit her at the same time.

S1: But we just figured out that it plays!

Reconhecer que o aparelho toca em todos os referenciais não foi imediatamente óbvio para os alunos. Mas quando acontece rapidamente ilustram a sua resposta para o referencial da Beth com um diagrama semelhante ao da Figura 2.3.

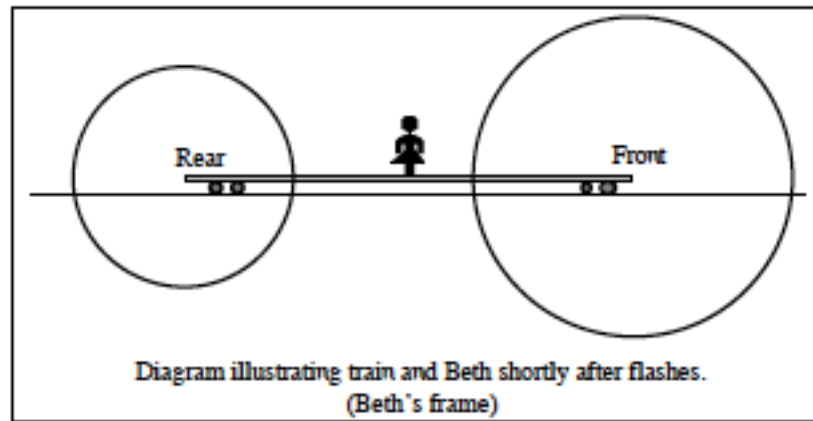


Figura 2.3 Diagrama do paradoxo do comboio para o referencial do comboio (p. 1243). Exemplo de um diagrama que ilustra a resposta dos estudantes à propagação dos sinais no referencial do comboio (Beth).

Os resultados dos pós-testes mostraram que as dificuldades são muito persistentes e resistentes à mudança e que os tutoriais ajudaram os alunos a desenvolver uma boa compreensão dessas ideias básicas. Os estudantes que trabalharam com os tutoriais melhoraram significativamente a sua capacidade de reconhecer e resolver alguns dos paradoxos clássicos de relatividade restrita.

Na abordagem tradicional, paradoxos são muitas vezes utilizados como atividades de eliciação ou ferramentas motivacionais. No entanto, a estratégia em que o instrutor expõe crenças dos alunos para gerar conflito cognitivo e de seguida resolve o paradoxo, é inadequada.

Segundo os autores, a experiência indica que o confronto e resolução têm de ser feitas pelo aprendiz, não pelo instrutor, para que exista aprendizagem significativa. Esta estratégia é especialmente importante quando as ideias são tão fortemente contraintuitivas, como no caso da relatividade (Scherr, Shaffer, & Vokos, 2002).

Pérez e Solbes (2003), Algunos problemas en la enseñanza de la relatividad

Metodologia

Aplicaram questionários para avaliarem o ensino e a aprendizagem no ensino secundário (3 níveis de ensino) a partir da perspectiva dos alunos, dos professores e dos manuais.

Participantes

165 alunos e 37 professores, espanhóis.

Conclusões do estudo

Concluíram que os livros de texto (30 manuais) não apresentavam adequadamente os conceitos de espaço e tempo, eram pouco clarificadores, não tinham em conta os pré-conceitos dos alunos e não realçavam a posição da teoria da relatividade na estrutura da física; os professores introduziam os conceitos de forma pouco crítica e reflexiva, utilizavam orientações epistemológicas distorcidas e não tinham em conta os resultados da investigação didática. Como consequência deste ensino, os alunos aprendiam de uma forma não significativa, em que se consolidavam pouco as novas concepções (Pérez & Solbes, 2003).

Hosson, Kermen e Parizot, 2010, Exploring students' understanding of reference frames and time in Galilean and special relativity

Metodologia

Este estudo teve como objetivo de investigar o raciocínio de estudantes de pós-graduação do curso de formação de professores de física. Utilizaram um questionário com questões de escolhas múltiplas pedindo a justificação da opção selecionada. Apenas duas questões envolviam o raciocínio relativista as outras (seis) eram referentes à cinemática galileana. As questões sobre a relatividade galileana procuravam identificar as dificuldades associadas ao conceito de referencial e a possível confusão entre o instante em que ocorre o evento e em que este é percebido pelo observador, identificado por Scherr et al., em 2001. As questões sobre a relatividade einsteiniana, invariância da velocidade da luz e simultaneidade, procuravam analisar a capacidade de mudança da estrutura interpretativa e determinar a extensão em que os alunos usavam a estrutura da cinemática clássica.

Participantes

94 estudantes de pós-graduação do Curso de Formação de professores de física, em que 44 destes estudaram relatividade especial nos seus cursos de física.

Conclusões do estudo

A análise das respostas mostrou uma falta de compreensão dos conceitos de referencial e evento. Alguns estudantes pensam que os eventos podem ser simultâneos para uns observadores e não simultâneos para outros no mesmo referencial. A maior parte dos estudantes não consegue dar a resposta dependendo apenas da localização do observador se este estiver em movimento, como se o movimento afetasse o evento. Os conceitos da cinemática clássica são dominantes na resolução das situações relativistas e os estudantes que frequentaram o curso de relatividade especial não conseguem dar melhor respostas em relação aos restantes. Existe confusão na compreensão da estrutura de espaço-tempo da cinemática clássica que constitui um grande obstáculo para a compreensão dos conceitos relativistas.

Selçuk, 2011, Addressing pre-service teachers' understandings and difficulties with some core concepts in the special theory of relativity

Metodologia

Selçuk, em 2011, realizou um estudo com o objetivo de investigar os conhecimentos e as dificuldades de dois grupos de estudantes de anos diferentes do ensino da física, sobre conceitos fundamentais da TRR. Os dados foram obtidos através de questionário e entrevistas, após formação no tema.

Participantes

185 estudantes turcos do ensino da física, de anos diferentes.

Conclusões do Estudo

Os resultados indicam que estes alunos, mesmo depois do ensino, têm dificuldades de compreensão dos conceitos, de tempo próprio, de comprimento próprio, de massa e de densidade relativista nomeadamente, consideram o referencial Terra como sistema absoluto, dois terços têm dificuldade em explicar o fenómeno da dilatação do tempo, a maior parte consegue aplicar a contração do comprimento mas considera que existe em todas as dimensões.

As entrevistas foram realizadas a 10 alunos para analisar mais detalhadamente os conhecimentos e as dificuldades dos estudantes. Relativamente à dilatação do tempo ilustramos com o exemplo das respostas de dois estudantes (S) as questões colocadas pelo investigador (R):

R: What kind of an occurrence do you think time dilation is? Can you explain it in detail?

S2: . . . I am hardly able to visualize this unobservable phenomenon in my daily experiences. Actually, I have doubts whether it is factual or not. But if it is factual, then I think some mechanical changes or defects happen to the clock which is located in the vehicle with a high speed. That's the reason why the clock runs slow and the observer's clock reads more. This impact is unilateral . . .

R: What is proper time, can you describe it?

S7: . . . proper time is what the observer in the motionless state on the ground measures.

R: What is the time called that the observer in motion measures?

S7: We call it relativistic time because we have time dilation in dynamic systems.

Também ilustramos as dificuldades com o conceito do comprimento:

R: Imagine that you are travelling on a spaceship moving at almost the speed of light. What would you observe the shape of the earth while passing by?

S9: 'I would see it almost spherical as usual but of course with a shorter radius . . . '

R: Why would it be spherical?

S9: I would perceive the dimensions shorter while travelling at a speed close to the speed of light.

S2: . . . I know it as the length which is measured by the observer at rest in a laboratory system.

R: What is the length called measured by the observer in motion?

S2: The length measured by the observer in motion is relativistic since the length of the objects is seen shorter.

R: Imagine that you are in a static position and a vehicle moving nearly at the speed of light passes by. What would you measure the length of the vehicle?

S2: Well, actually it is hard to imagine. But since I am static I would measure the length the same (as it is measured when the object itself is static).

As conclusões deste estudo estão de acordo com os estudos anteriores em que as dificuldades de compreensão da relatividade dos sistemas de referência não se limitam à relatividade especial, mas também a dificuldades com a relatividade clássica e ainda, que muitos alunos recorrem às suas percepções espontâneas para explicar os acontecimentos.

Considerando que o conhecimento existente tem uma significativa influência na aprendizagem da ciência, Selçuk propõe que através da aplicação de diferentes ou alternativas técnicas de ensino, os professores podem facilmente eliminar e/ou minimizar esses preconceitos imprecisos e as dificuldades que enfrentam no processo de aprendizagem.

Tabela síntese dos estudos das dificuldades conceptuais

A Tabela 2.2, sintetiza os estudos que evidenciam dificuldades conceptuais em termos de participantes, metodologia e conclusões.

Tabela 2.2 Síntese dos estudos sobre as dificuldades conceptuais da TRR

Estudo	Participantes	Metodologia	Conclusões
Saltiel e Malgrange 1980	80 crianças de onze anos e 700 alunos universitários do primeiro ano e do quarto ano.	Utilização de entrevistas	<ul style="list-style-type: none">– As respostas certas e erradas variavam pouco nos dois grupos– O pensamento espontâneo não é consequência apenas da aprendizagem escolar– A existência de uma estrutura organizada, modelo natural, em oposição ao modelo cinemático– Dois tipos de movimento: o “real” e o “aparente”

Estudo	Participantes	Metodologia	Conclusões
Posner, Kenneth, Hewson e Gertzog 1982	Estudantes universitários de física, que tinham completado a unidade sobre a TRR e professores de física.	Utilização de entrevistas	– Identificação de “metaphysical beliefs”, como por exemplo o espaço e o tempo serem absolutos
Hewson 1982	1 monitor de um curso de iniciação de física	Utilização de entrevistas em três fases (estudo de caso)	<ul style="list-style-type: none"> – Visão mecanicista do mundo em que os objetos têm propriedades fixas (como o comprimento) e as explicações dos fenômenos relativistas são em termos desses objetos e das suas interações – O comprimento é constante, independentemente do referencial – A contração do comprimento é uma distorção da percepção, não ocorrendo na realidade – A TRR é considerada plausível, para se poder fazer parte da comunidade dos físicos – As concepções existentes desempenham um papel muito importante no modo como interpretam conceitos complexos
Villani e Pacca 1987	65 estudantes brasileiros graduados em física e a frequentar o mestrado ou o doutoramento em física	Utilização de entrevistas dirigidas usando duas situações problema	<ul style="list-style-type: none"> – Apesar de existirem previsões corretas, estas eram acompanhadas de raciocínios incompletos ou misturados com noções espontâneas – No problema sobre as distâncias era como se só existisse uma velocidade para a luz e para os comboios, e uma única distância percorrida independentemente da localização dos observadores – A independência entre noções cinemáticas e sistema de referência – A utilização de um esquema tipo “arrastamento” para ajustar as distâncias – Dois tipos de movimento: o “real” e o “aparente” – As noções espontâneas permaneciam num estado latente na mente dos estudantes, reaparecendo em situações de utilização de esquemas formais menos imediatos e de insegurança dos alunos – Na história da física, mesmo de uma forma superficial, encontrava-se a ideia de movimento semelhante à destes estudantes
Valadares 1994	53 professores portugueses do ensino secundário	Curso de formação de professores Teste utilizando três situações problema	<ul style="list-style-type: none"> – Os professores portugueses revelaram o mesmo o mesmo tipo de raciocínio espontâneo que os estudantes brasileiros no estudo de Villani e Pacca, 1987. – Independentemente da sua experiência e da sua formação académica, revelaram a presença de ideias espontâneas, as quais influenciam o modo como raciocinam perante situações menos familiares, principalmente quando não podem refugiar-se em formalismos matemáticos rotineiramente aplicados

Estudo	Participantes	Metodologia	Conclusões
Scherr, Shaffer e Vokos 2001	Mais de 800 estudantes universitários norte-americanos, provenientes de diferentes cursos	Análise das respostas escritas a questões colocadas durante o curso, nuns grupos em situação de pré-teste e noutros em pós-teste Análise de entrevistas individuais	<ul style="list-style-type: none"> – Dificuldades na relatividade da simultaneidade e no papel do observador colocado no sistema inercial de referência – Confusão entre o instante em que ocorreu o evento e o instante em que este evento era percebido por um observador – Dificuldades em reconhecer a equivalência relativa dos observadores em repouso, ou no mesmo referencial, e aplicar a definição de simultaneidade – Construção de um quadro conceptual em que a simultaneidade absoluta e a relativa coexistiam
Scherr, Shaffer e Vokos 2002	Mais de 350 estudantes universitários norte-americanos, provenientes de diferentes cursos	Utilização de tutoriais Trabalho colaborativo em pequenos grupos Atividades de trabalho de casa Pré-teste Pós-teste	<ul style="list-style-type: none"> – As dificuldades são muito persistentes e resistentes à mudança – Os estudantes que trabalharam com os tutoriais melhoraram significativamente a sua capacidade de reconhecer e resolver alguns dos paradoxos clássicos de relatividade restrita – Na abordagem tradicional os paradoxos são muitas vezes utilizados como atividades de eliciação ou ferramentas motivacionais. No entanto, a estratégia em que o instrutor expõe crenças dos alunos para gerar conflito cognitivo e de seguida resolve o paradoxo, é inadequada – O confronto e resolução têm de ser feitas pelo aprendiz, não pelo instrutor, para que exista aprendizagem significativa. Esta estratégia é especialmente importante quando as ideias são tão fortemente contraintuitivas como no caso da relatividade
Pérez e Solbes 2003	165 alunos e 37 professores, espanhóis	Aplicação de questionários	<ul style="list-style-type: none"> – Os professores introduziam os conceitos de forma pouco crítica e reflexiva, utilizavam orientações epistemológicas distorcidas e não tinham em conta os resultados da investigação didática – Os alunos aprendiam de uma forma não significativa, em que se consolidavam pouco as novas concepções
Hosson, Kermen e Parizot 2010	94 estudantes de pós-graduação do Curso de Formação de professores de física, em que 44 destes estudaram relatividade especial nos seus cursos de física	Aplicação de um questionário	<ul style="list-style-type: none"> – Dificuldades de compreensão dos conceitos de referencial e evento – Os eventos podem ser simultâneos para uns observadores e não simultâneos para outros no mesmo referencial – Dificuldades em dar a resposta dependendo apenas da localização do observador se este estiver em movimento, como se o movimento afetasse o evento – Os conceitos da cinemática clássica são dominantes na resolução das situações relativistas e os estudantes que frequentaram o curso de relatividade especial não conseguem dar melhores respostas em relação aos restantes. – Confusão na compreensão da estrutura de espaço-tempo da cinemática clássica que constitui um grande obstáculo para a compreensão dos conceitos relativistas

Estudo	Participantes	Metodologia	Conclusões
Selçuk 2011	185 estudantes turcos do ensino da física, de anos diferentes	Aplicação de questionários e entrevistas, após formação no tema	– Conclusões de acordo com os estudos anteriores em que as dificuldades de compreensão da relatividade dos sistemas de referência não se limitam à relatividade especial, mas também a dificuldades com a relatividade clássica e ainda, que muitos alunos recorrem às suas percepções espontâneas para explicar os acontecimentos.

2.3.2 Algumas propostas didáticas existentes na literatura

Relativamente às propostas didáticas existem várias com quadros teóricos diferentes. Salientamos por exemplo, as propostas de Angotti, Caldas, Neto & Rüdinger (1978); Villani (1980) e Arriasecq & Greca (2010).

Angotti, Caldas, Neto e Rüdinger, 1978, Teaching relativity with a different philosophy

Participantes

Na primeira fase 120 alunos brasileiros do 1.º ano de engenharia e matemáticas e na segunda fase, 70 alunos brasileiros do 2.º ano de física.

Proposta didática

Elaboraram e aplicaram uma sequência didática para os primeiros anos do ensino universitário, em que é dada a prioridade a objetivos atitudinais por oposição a objetivos de conteúdo. Como objetivos atitudinais escolheram os seguintes: (i) fazer o estudante participar no desenvolvimento do pensamento físico (embora não necessariamente, seguindo a sequência histórica), criando nele a necessidade de introduzir novos conceitos; (ii) fazer o estudante exercitar sua capacidade de formular e julgar hipóteses alternativas mediante uma análise conceitual dos resultados inesperados, desenvolvendo, assim, a sua imaginação e faculdade crítica, e preparando-o para situações inesperadas bem como mudanças de conceitos fundamentais; (iii) ensinar o estudante a discutir, a ouvir outras pessoas, e a "viver com algumas incertezas" expondo-se, no sentido de colocar hipóteses para julgamentos e críticas dos seus colegas; (iv) ensinar o estudante a julgar, através de exemplos, as implicações sociais de uma nova tecnologia resultante do progresso teórico.

O método de ensino adotado tem como estruturante a *discussão* de situações apresentadas aos alunos, por exemplo filmes, com a finalidade de estes obterem respostas aos fenómenos apresentados.

Tendo em conta o conteúdo abstrato deste tema, os autores pretenderam tornar a teoria mais concreta para o aluno e ao mesmo tempo ensinar os seus conceitos fundamentais, por isso optaram por iniciar pelo

concreto passar ao abstrato e depois voltar novamente para o concreto. Inspirados na ideia de Haber-Shaim, começaram pela dinâmica através da evidência experimental exibida no filme *velocidade limite*⁶, de Bertozzi. Passaram à parte abstrata da cinemática relativista mostrando o filme *dilatação do tempo*⁷, de Friedman, Frich e Smith, para mais tarde ligaram novamente à dinâmica. Optaram por enfatizar os conceitos fundamentais o que levou a grandes discussões dos aparentes paradoxos da teoria em vez de aspectos mais matemáticos e aplicação de fórmulas, assim consideraram as transformações de Lorentz opcional. A sequência didática está dividida em 5 partes: dinâmica relativista (4 horas); medição do tempo e do espaço (3 horas); simultaneidade (3 horas); transformação de Lorentz (opcional, 4 horas) e revisão história e síntese (3 horas).

Resultados/algumas conclusões

A avaliação foi realizada por duas fases. A primeira foi uma avaliação formativa do 1.º ano de engenharia e matemáticas, para revisão do módulo. A segunda fase foi aplicada a estudantes do 2.º ano de física, onde 2/3 dos alunos já tinham estudado a TRR (mas metade apenas tinha estudado a cinemática relativista). A estes últimos alunos aplicaram um pré-teste e um pós-teste, complementado com entrevistas com alguns alunos. A tendência foi muito positiva aparentemente os alunos foram fortemente motivados para esta análise mais qualitativa da TRR. Segundo os autores, aparentemente os filmes ajudaram na interpretação da teoria levando-os a concluir que os alunos têm relutância em aceitar os efeitos da relatividade como reais, mais de metade acreditava que era uma espécie de ilusão. Estes conceitos da relatividade são muito mais difíceis de aceitar e sem identificação com experiências do quotidiano, que a maioria dos manuais escolares querem fazer crer (muitas vezes escondendo a dificuldade por aspectos matemáticos).

Os autores referiram ainda, que não é fácil aplicar um curso com uma forte componente com objetivos atitudinais, sendo uma das principais dificuldades o professor aceitar não conduzir a discussão e não dar informação aos alunos.

Villani, 1980, Análise de um curso de introdução à relatividade

Participantes

16 estudantes universitários brasileiros do 2.º ano de física.

⁶ Este filme pode ser visualizado em http://education.jlab.org/scienceseries/ultimate_speed.html

⁷ Este filme pode ser visualizado em <https://www.youtube.com/watch?v=tnao7JWo8mA>

Proposta Didática

O módulo de Angotti et al. (1978), mencionado anteriormente, foi novamente testado por outro grupo de investigadores, entre os quais Villani, a estudantes universitários do 2.º ano de física. O curso foi dado em 4 dias (21 horas), sendo o último dia dedicado à avaliação. Este investigador considera que o módulo está bem “cuidado e elaborado”, no entanto a última parte (parte 5) deveria ser reformulada dado que “não existem pontos concretos de análise do significado da revolução einsteiniana do ponto de vista científico e cultural” (p. 30). E sugere iniciar o módulo da TRR com o problema que a Relatividade apresenta na história da ciência (Villani, 1980), defendendo que a analogia entre o desenvolvimento histórico da TRR e o processo de aprendizagem dos alunos permite várias considerações sobre a melhor forma de ensinar a teoria. O processo histórico da aceitação da TRR pode fornecer uma série de considerações e sugestões, nomeadamente, a reconstrução do contexto em que emergiu a nova teoria, com a finalidade de revelar os argumentos que lhe deram plausibilidade; descrever o contexto de aceitação e rejeição da teoria e por fim, o desenvolvimento da teoria, para seleccionar as perspectivas mais convincentes. Estas informações podem ajudar a perceber as dificuldades dos alunos e encontrar modos de as superar, transformando argumentos históricos em práticas de ensino (Villani, 1980; Villani & Arruda, 1998).

Resultados

Os resultados foram bastante satisfatórios, o que permitiu concluir que os conceitos estavam suficientemente fundamentados para permitir a percepção das contradições, inconsistências, problemas, etc. Os professores confirmaram o papel importante das discussões entre os alunos.

Arriassecq e Greca, 2010, A teaching-learning sequence for the special relativity theory at high school level historically and epistemologically contextualised

Participantes

27 alunas argentinas do último ano do ensino secundário.

Proposta didática

Elaboraram uma sequência didática de ensino e aprendizagem para o ensino secundário sobre a TRR, adotando um quadro teórico assente em três componentes complementares: epistemológica; psicológica e pedagógica. Na componente epistemológica, seguindo Bachelard, fizeram uma análise epistemológica do conteúdo da TRR, como ponto de partida que ajudou a definir os conceitos centrais que os alunos deveriam interpretar e construir no quadro desta teoria (conceitos de espaço e de tempo, e as noções associadas ao referencial, ao observador, à simultaneidade e à medição). Na componente psicológica tiveram em conta as teorias do ensino e aprendizagem de Vergnaud, Ausubel e Vigotsky. Na componente

didática, para uma abordagem de ensino mais específico, adotaram Martinand, que propõe a noção de “objetivos-obstáculos”. Isto significa que o progresso intelectual para ser alcançado dentro de um contexto de ensino deve corresponder à superação epistemológica, psicológica e de obstáculos metodológicos. Desta forma, o ensino, especialmente no ensino de ciências, não deve ser definido a priori e independentemente das representações mentais dos alunos, que é o que normalmente acontece. Pelo contrário, ele deve corresponder a transformações intelectuais dos estudantes quando um certo obstáculo é superado, com o professor atuando como mediador no contexto de sala de aula.

A proposta didática está organizada em 5 fases: discussão de questões de natureza histórica e epistemológica (duração de 2 h); revisão de conceitos de mecânica clássica (duração de 4 h); conceitos do eletromagnetismo que entram em conflito com a mecânica clássica (duração de 2 h); aspectos fundamentais da TRR (duração de 8 h) e aspectos da vida de Einstein (duração de 2 h). A previsão da duração do módulo é de 18 h, não contabilizando o tempo despendido pelos alunos fora da sala de aula (Arriassecq, 2008; Arriassecq & Greca, 2006, 2010).

Resultados/algumas conclusões

A análise de dados recolhidos a partir de teste inicial, pós-teste, mapas conceptuais, atividades feitas pelos alunos, notas de campo e aulas gravadas em áudio, mostra que os alunos foram capazes de modificar alguns conceitos que não eram cientificamente corretos quando trabalharam com questões da Mecânica Clássica, fundamentais para a aprendizagem significativa dos temas da TRR. E que os resultados obtidos em termos de aprendizagem de conceitos fundamentais da TRR parecem ser muito mais positivos do que os resultados obtidos de outro grupo de estudantes que tinham apenas o texto escrito/manual como único recurso didático, ou seja, uma abordagem à TRR de uma forma dita tradicional.

Os autores consideram que este trabalho mostra que é possível introduzir elementos da TRR no ensino secundário, apesar da falta de conhecimento sobre este tema dos professores e do pouco tempo disponível para este assunto. Aparentemente a introdução a esta teoria mostra-se rentável para os alunos não só porque são introduzidos conhecimentos de física moderna com mais de um século, mas também porque lhes permite rever e aprofundar conceitos clássicos como, tempo, espaço, referenciais, simultaneidade, observador e medição que passam despercebidos nas práticas do ensino tradicional.

Outras propostas

Os resultados dos diferentes trabalhos indicam que as dificuldades de compreensão do tema TRR existem independentemente o grau académico dos estudantes, incluindo os professores. A aplicação de diferentes técnicas de ensino, pelos professores, podem eliminar e/ou minimizar esses pré-conceitos e as dificuldades que enfrentam no processo de aprendizagem (Selçuk, 2011).

Atualmente existem diversas propostas didáticas envolvendo o uso de computadores, por exemplo, tutoriais, aquisição de dados, simulação, modelação, entre outras, (por exemplo, Castilho & Ricci, 2006; Machado & Nardi, 2006; McGrath, Wegener, McIntyre, Savage, & Williamson, 2010). Vários investigadores sugerem que a modelação computacional pode constituir uma das possibilidades mais promissoras para o ensino/aprendizagem da física, permitindo a *reificação* dos conceitos, isto é, concretizar os objetos abstratos em objetos diretamente manipuláveis, o que a simples manipulação em papel não permite (Teodoro, 2005; Teodoro & Neves, 2011)

A revisão da bibliografia existente aponta para um problema didático da existência de dificuldades de ensino e de aprendizagem na TRR e para o qual o presente trabalho pretende contribuir e clarificar.

2.4 Teorias da aprendizagem

O impacto dos primeiros estudos sobre concepções alternativas originou não só uma enorme quantidade de pesquisas da mesma natureza, mas também pesquisas com outros objetivos. Como é a interação entre o conhecimento prévio e um novo conhecimento aparentemente incompatível? Por que persiste o conhecimento prévio? Através de que processo(s) as pessoas mudam as suas concepções alternativas por concepções aceites no contexto científico? Como ocorre a mudança conceitual? Tantas foram as tentativas de responder a questões desse tipo que se pode classificar a década de 1980, no que se refere à pesquisa em didática das ciências, como a “década da mudança conceitual” (Moreira & Greca, 2003, p. 302).

Apesar de existir uma grande variedade de diferentes abordagens, há pelo menos duas características comuns: a aprendizagem dá-se através do envolvimento ativo do aprendiz na construção do seu conhecimento; as ideias prévias dos estudantes desempenham um papel importante no processo de aprendizagem (Montimer, 1995).

Um dos trabalhos mais conhecidos é o de Posner et al. (1982). O reconhecimento de que o conhecimento prévio influencia a aprendizagem, conjuntamente com as ideias de acomodação e assimilação de Piaget e da filosofia da ciência, influenciaram Posner et al. (1982) sobre as concepções alternativas e a mudança conceptual na aprendizagem em ciência. Estes autores identificaram quatro condições para a mudança conceitual ocorrer: (i) o aluno deve estar insatisfeito com as concepções existentes; (ii) as novas concepções devem ser inteligíveis; (iii) plausíveis e (iv) frutíferas (permitir novas possibilidades), ou seja, segundo este modelo há condições para a mudança conceitual quando existe insatisfação com a concepção que alguém tem e quando o indivíduo se encontra com uma nova concepção (cientificamente aceite) que é inteligível e lhe parece plausível e frutífera. O modelo da mudança conceitual de Posner et al. parte da suposição de que existem padrões análogos de mudança conceptual na aprendizagem e no

desenvolvimento das teorias científicas, podendo assim aplicar-se aos alunos os esquemas de mudança propostos na filosofia da ciência. A Teoria da Relatividade Restrita foi o tópico escolhido por estes autores pelo facto de ele ser visto como protótipo de uma revolução científica.

Os modelos que sugerem a mudança conceptual como uma substituição de uma concepção por outra na estrutura cognitiva do aprendiz foram postos em causa por resultados de sala de aula. Por exemplo, Scott, em 1987, refere que:

Rather than conceptual change there appeared to be a parallel development of particle ideas alongside already existing ones (...) The parallel development of ideas resulted in alternative explanations which can be employed as and when appropriate. There was no major conceptual change of the kind referred by Posner et al(1982) as an 'accommodation' (Philip Scott, 1987, p. 417).

Segundo Moreira e Greca (2003) este tipo de mudança conceptual não existe. As concepções alternativas aprendidas de modo significativo, no sentido usado por Ausubel e Novak, não são “apagáveis”.

“É uma ilusão pensar que um conflito cognitivo e/ou uma nova concepção plausível, inteligível e frutífera conduzirá à substituição de uma concepção alternativa significativa.

Quando as estratégias de mudança conceitual são bem sucedidas, em termos de aprendizagem significativa, o que fazem é adicionar novos significados às concepções já existentes, sem apagar ou substituir os significados que já tinham” (Moreira & Greca, 2003, p. 305).

Nas conclusões deste artigo, referem ainda que

“Tentemos imaginar o desenvolvimento conceitual em termos de construção e discriminação de significados e esqueçamo-nos de substituir concepções, uma visão que nos lembra o enfoque comportamentalista de instalar e extinguir comportamentos no repertório do aprendiz” (p. 312)

De seguida, vamos fazer uma breve abordagem ao significado de aprender significativamente segundo a Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS).

2.4.1 Aprendizagem significativa

A aprendizagem significativa, por definição, envolve a aquisição de novos significados (Ausubel, 2003, p. 71) e caracteriza-se pela interação entre os conhecimentos prévios e os novos conhecimentos, sendo essa interação não-literal e não-arbitrária. Nesse processo, os novos conhecimentos adquirem significado para o sujeito e os conhecimentos prévios adquirem novos significados ou maior estabilidade cognitiva.

Para Ausubel, a estrutura cognitiva, considerada como uma estrutura de subsunçores interrelacionados e organizados hierarquicamente, é a variável independente mais importante para a aprendizagem significativa de novos conhecimentos (Ausubel, 2003). Mas nem sempre é uma variável facilitadora, pode

ser bloqueadora, funcionar como o que Gaston Bachelard chamou de *obstáculo epistemológico*. Portanto, dizer que o conhecimento prévio é a variável que mais influencia a aprendizagem significativa de novos conhecimentos não significa dizer que é sempre uma variável facilitadora, em alguns casos, pode ser bloqueadora. A aprendizagem significativa também não é, necessariamente, a considerada “correta”. As conhecidas concepções alternativas, geralmente são aprendizagens significativas e, por isso, tão resistentes à mudança conceitual (Moreira, 2012).

Condições para a aprendizagem significativa

Existem duas condições fundamentais para a aprendizagem significativa:

- 1 - O material de aprendizagem deve ser *potencialmente* significativo;
- 2 - O aprendiz deve apresentar uma predisposição para aprender.

A primeira condição implica que o material de aprendizagem (livros, aulas, aplicativos, etc.) tenha significado lógico (isto é, seja relacionável de maneira não-arbitrária e não-literal a uma estrutura cognitiva apropriada e relevante) e, a segunda condição, que o aprendiz tenha em sua estrutura cognitiva ideias-âncora relevantes (subsunçores) com as quais esse material possa ser relacionado e que esteja psicologicamente motivado para aprender (relacionar com as ideias relevantes ancoradas nas estruturas cognitivas dos mesmos). Se o intuito do aprendiz for memorizar a nova informação de forma arbitrária e literal, isto é, sem relacioná-la com os subsunçores adequados existentes na sua estrutura cognitiva, ou porque não existem, quer o processo de aprendizagem quer o resultado devem ser necessariamente memorizados e sem sentido (Ausubel, 2003).

Quando o aprendiz não dispõe de subsunçores adequados que lhe permitam atribuir significados aos novos conhecimentos, o problema pode ser resolvido com os organizadores prévios ou avançados. O organizador prévio é um recurso instrucional apresentado com um nível mais alto de abstração, generalidade e inclusão em relação ao material de aprendizagem, por exemplo, um enunciado, uma pergunta, uma situação-problema, uma demonstração, uma analogia, uma imagem, um filme, uma leitura introdutória, uma simulação, uma aula que precede um conjunto de outras aulas, isto é, os organizadores prévios podem ser usados para suprir a deficiência de subsunçores ou para mostrar a ligação entre novos conhecimentos e conhecimentos já existentes (subsunçores). No entanto, se o aluno não tem subsunçores relevantes à aprendizagem de novos conhecimentos, o melhor é facilitar, promover, a sua construção antes de prosseguir (Moreira, 2012).

Aprendizagem por receção

Ausubel defende que a aprendizagem pode ser por *receção* em que o aprendiz “recebe” a informação, o conhecimento, a ser aprendido na sua forma final. Mas isso não significa que essa aprendizagem seja passiva, nem que esteja associada ao ensino expositivo tradicional. A “receção” do novo conhecimento pode ser, por exemplo, através de um livro, de uma aula, de uma experiência de laboratório, de um filme, de uma simulação computacional, de uma modelagem computacional, etc. Aprender recetivamente significa que o aprendiz não precisa descobrir para aprender significativamente. Mas isso não implica passividade, ao contrário, a aprendizagem significativa recetiva requer muita atividade cognitiva para relacionar, interativamente, os novos conhecimentos com aqueles já existentes na estrutura cognitiva, envolvendo processos de captação de *significados*, *ancoragem*, *diferenciação progressiva* e *reconciliação integrativa*.

A estrutura cognitiva é uma estrutura dinâmica caracterizada por dois processos principais, a *diferenciação progressiva* e a *reconciliação integradora*. A *diferenciação progressiva* é o processo de atribuição de novos significados a um dado subsunçor (um conceito ou uma proposição, por exemplo) resultante da sucessiva utilização desse subsunçor para dar significado a novos conhecimentos. A *reconciliação integradora*, ou *integrativa*, é um processo da dinâmica da estrutura cognitiva, simultâneo ao da diferenciação progressiva, que consiste em eliminar diferenças aparentes, resolver inconsistências, integrar significados, fazer superordenações (reorganização conceitual e cognitiva).

O ensino deveria começar com os aspectos mais gerais, mais inclusivos, mais organizadores, do conteúdo e, então, progressivamente diferenciá-los. No entanto, não seria uma abordagem dedutiva, uma vez introduzidos os conceitos e proposições mais gerais e inclusivos, eles devem imediatamente serem exemplificados, trabalhados em situações de ensino. Ao longo de todo o curso de uma disciplina, por exemplo, os conteúdos gerais e específicos devem ser trabalhados numa perspetiva de diferenciação e integração, de descer e subir, várias vezes, nas hierarquias conceituais. Também não é uma abordagem indutiva, são as duas coisas, diferenciação progressiva e reconciliação integradora, acontecendo, intencionalmente, ao mesmo tempo, assim como a reconciliação horizontal entre os conceitos, também característica da reconciliação integradora como mostra a Figura 2.4 (Moreira, 2012; 2013).

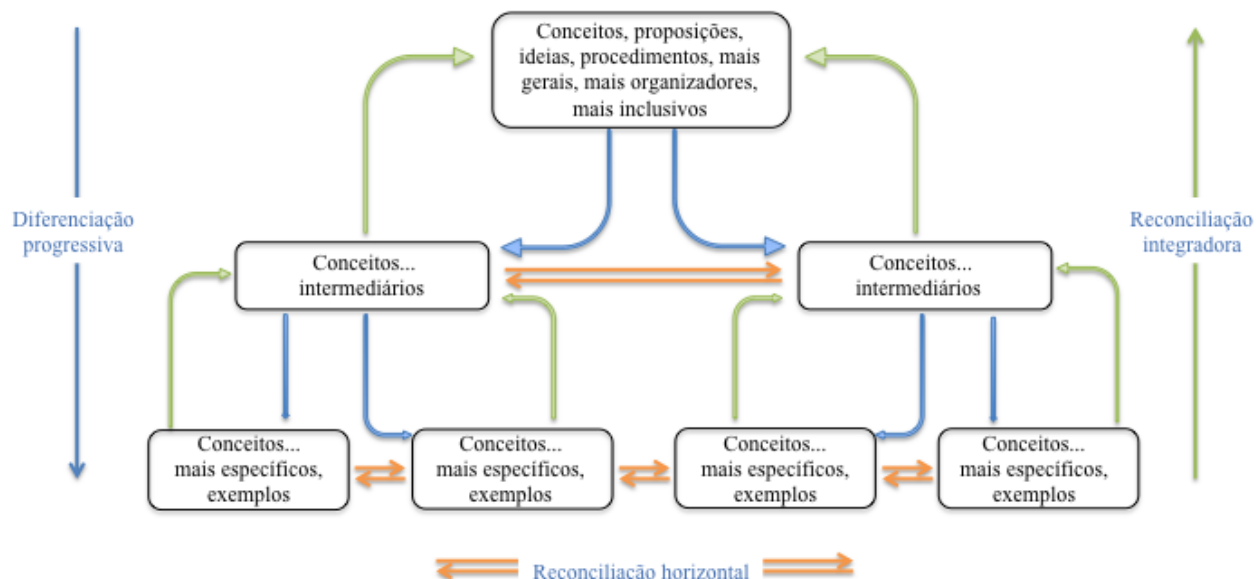


Figura 2.4 Diagrama da diferenciação progressiva e da reconciliação integradora, assim como da reconciliação horizontal, mostrando que são independentes e simultâneos na estrutura cognitiva e no ensino (adaptado de Moreira, 2012; 2013)

Além da diferenciação progressiva, da reconciliação integradora e dos organizadores prévios, Ausubel recomendava também o uso dos princípios da *organização sequencial* e da *consolidação* para facilitar a aprendizagem significativa. Os tópicos a ensinar devem ter uma sequência de forma que dependam naturalmente dos que os antecedem e deve-se insistir nos conhecimentos prévios para que estes sejam aprendidos significativamente (consolidados) antes de introduzir novos conhecimentos. A consolidação não é imediata, demora tempo, e por isso a resolução de situações-problema, clarificações, discriminações, diferenciações, integrações são importantes antes de inserir novos conhecimentos.

Estratégias e instrumentos facilitadores da aprendizagem significativa

As estratégias e os instrumentos facilitadores da aprendizagem significativa são, por exemplo, os *organizadores prévios*, já mencionados, os *mapas de conceitos*, os *diagramas em V*, as *atividades colaborativas*.

Os *mapas de conceitos* são diagramas de conceitos hierárquicos que têm como objetivo representar as relações significativas entre conceitos na forma de proposições (Novak & Gowin, 1996). Tendo em conta que as pessoas pensam com os conceitos e os mapas de conceitos servem para exteriorizar os conceitos e melhorar o pensamento, pode-se obter uma visualização da organização conceitual do aprendiz sobre determinado conhecimento e efetuar uma avaliação qualitativa e formativa da aprendizagem (Moreira, 1988; Novak & Gowin, 1996).

Os *Diagramas em V*, ou *V de Gowin* como foi publicado por Gowin em 1981 (Gowin & Alvarez, 2005), são instrumentos heurísticos que enfatizam a interação entre o pensar (domínio conceptual) e o fazer (domínio metodológico) na produção de conhecimentos a partir de uma questão-foco. Estes diagramas ajudam a identificar as componentes do conhecimento e a clarificar a sua relação, apresentando-os numa visualização compacta e clara (Novak & Gowin, 1984; Gowin & Alvarez, 2005; Moreira, 2012).

As *atividades colaborativas*, presenciais ou virtuais, em pequenos grupos têm também grande potencial para facilitar a aprendizagem significativa porque permitem o intercâmbio, a negociação de significados, e colocam o professor na posição de mediador.

Segundo Moreira (2012), isto não significa que uma aula expositiva não promova a aprendizagem significativa e a construção de um mapa conceptual ou um diagrama em V não incentive a aprendizagem mecânica. A aprendizagem significativa depende mais da postura do professor e das diretrizes escolares do que das novas metodologias, incluindo as tecnologias de informação e comunicação (TIC). A avaliação da aprendizagem significativa deve ser predominantemente formativa e recursiva. É necessário encontrar evidências de que ocorreu aprendizagem significativa. É importante a recursividade, ou seja, permitir que o aprendiz refaça, mais de uma vez se for o caso, as tarefas de aprendizagem. É importante que ele exteriorize os significados que está adquirindo, que explique e que justifique as suas respostas.

2.4.2 Relação da aprendizagem significativa com as outras teorias da aprendizagem

Moreira, Caballero e Rodríguez referem que a aprendizagem significativa é compatível com outras teorias construtivistas, sendo do ponto de vista instrucional mais útil na visão original de Ausubel e, mais tarde, na de Novak e de Gowin (Moreira, Caballero, & Rodríguez, 1997):

“Pode-se não aceitar os conceitos ausubelianos como diferenciação progressiva, reconciliação integrativa e organizador prévio, mas o princípio fundamental de que o conhecimento prévio é a variável isolada que mais influência a aquisição significativa de novos conhecimentos não pode ser ignorado e deixa claro que sua teoria não pode ser tomada como superada. Essa é uma proposição subjacente a qualquer teoria construtivista” (Moreira, 2012, p. 55).

Assim como Ausubel fala em subsunção, cada teoria construtivista tem o seu constructo básico. Na Teoria de Piaget o constructo básico é o *esquema*, o indivíduo aprende, ou constrói novos esquemas, a partir dos esquemas que já construiu. Na Teoria de Kelly, o constructo básico é o de *constructo pessoal*, o sujeito aprende, ou constrói novos constructos, a partir dos constructos que já construiu. Na teoria de Johnson-Laird, o constructo fundamental é o de *modelo mental*, o sujeito constrói novos modelos mentais a partir da recursividade de modelos anteriores, de primitivos conceituais e da percepção. Vergnaud também usa o conceito de esquema, mas os seus esquemas contêm *invariantes operatórios* que se constituem um

conhecimento prévio implícito e têm grande influência na construção de novos esquemas e novos conceitos. Portanto, o conceito de aprendizagem significativa, como aquela em que novos conhecimentos adquirem significados através da interação com conhecimentos especificamente relevantes já existentes na estrutura cognitiva de aprendiz, é subjacente a várias teorias (Moreira et al., 1997). No entanto, estas teorias são mais dirigidas para o desenvolvimento cognitivo enquanto a Teoria da Aprendizagem Significativa ocupa-se mais da aquisição significativa de um corpo organizado de conhecimentos em situação formal de ensino e aprendizagem (Moreira, 2012).

Tem-se falado essencialmente da aprendizagem significativa do ponto de vista cognitivo mas para Novak uma teoria da educação deve considerar que as pessoas pensam, sentem e agem e deve ajudar a melhorar como elas o fazem. Novak deu uma dimensão humanista à Teoria da Aprendizagem Significativa

“A predisposição para aprender colocada por Ausubel como uma das condições para a aprendizagem significativa, está para Novak, intimamente relacionada com a experiência afetiva que o aprendiz tem no evento educativo” (Moreira et al., 1997, p.31).

Relativamente a Gowin a sua contribuição para a Teoria da Aprendizagem Significativa é muito mais do que o Vê epistemológico. Gowin considera que existe uma relação triádica entre o professor, os materiais educativos e o aprendiz (Gowin, 1981), ou seja, existe partilha de significados entre o aluno e o professor relativamente aos materiais educativos do currículo, mas com papéis diferentes. O professor é responsável por verificar se os significados que o aluno capta são aqueles partilhados no contexto da matéria de ensino. O aluno é responsável por verificar se os significados que captou são aqueles que o professor pretendia que ele captasse. Se é alcançada a partilha de significados, o aluno está pronto para decidir se quer aprender significativamente ou não. Aprender de maneira significativa é uma responsabilidade que não poder ser partilhada (Moreira et al., 1997; Novak & Gowin, 1996).

Esta visão de Gowin sobre o ensino, como uma busca de congruência de significados, assemelha-se à abordagem vygotskyana (Moreira, 2009; Moreira et al., 1997). Para Vygotsky (1978), aprender não é apenas um processo de construção pessoal, as interações sociais também facilitam este processo quando a aprendizagem ocorre na “zone of proximal development” que define como sendo:

“(…) the distance between the actual developmental level as determined by independent problem solving and the level of potential development as determined through problem solving under adult guidance or in collaboration with more capable peers” (Vygotsky, 1978, p. 86).

2.5 Transposição didática

Os cientistas *fazem* ciência, enquanto os alunos *aprendem* ciência, mas o que os cientistas fazem e os alunos aprendem, em nome da ciência, não é a mesma coisa. Para que a *ciência dos cientistas* seja ensinada aos alunos, tem que ser recontextualizada em *ciência da escola* (Sharma & Anderson, 2009). Como introduzir o *saber científico*, no nosso caso a TRR de Einstein, na sala de aula?

Para compreender melhor como a adaptação de como o conhecimento científico ocorre, Brockington e Pietrocola (2005), recorreram a um conceito da didática das ciências, denominado de transposição didática, que se tem mostrado ser uma ferramenta de análise no entendimento do processo de transformação da Física Moderna e Contemporânea para a sala de aula.

2.5.1 O que é a transposição didática?

O conceito da transposição didática teve a sua origem com o sociólogo Michel Verret, em 1975 e foi desenvolvido na didática da matemática por Yves Chevallard, em 1980. Para este autor, um conteúdo de saber que tenha sido definido como saber a ser ensinado, sofre a partir de então um conjunto de transformações adaptativas que vão torná-lo próprio para ocupar um lugar entre os objetos de ensino. O “trabalho” que faz de um objeto de saber a ensinar, um objeto de ensino chama-se *transposição didática*⁸ (Chevallard, 1998). Assim, a transposição didática analisa as transformações ocorridas no saber de referência, *saber sábio*, até se tornar um saber da sala de aula, *saber ensinado* (Siqueira & Pietrocola, 2006). A compreensão de como a produção científica passa da comunidade científica para a sala de aula, pressupõe que existe uma maior capacidade para propor alternativas para a inserção de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Secundário (Siqueira, Brockington, & Pietrocola, 2008).

2.5.2 Como o saber sobrevive?

A transposição didática funciona como um instrumento de análise que permite fazer o trajeto do saber, desde a sua origem até à sala de aula, podendo dar indícios de características relevantes para que um determinado saber esteja presente nos livros didáticos e nas salas de aula, ou seja, permite dar indicações de características importantes que, combinadas, definem a sobrevivência de um saber que pretende tornar-se objeto de ensino. A propósito do conceito matemático de distância, Yves Chevallard e Marie-Alberte Johsua, em 1982, caracterizaram diversas etapas e regras que deveriam ser observadas durante o processo

⁸ No livro original: *Un contenu de savoir ayant été désigné comme savoir à enseigner subit dès lors un ensemble de transformations adaptatives qui vont le rendre apte à prendre place parmi les objets d'enseignement. Le “travail” qui d'un objet de savoir à enseigner fait un objet d'enseignement est appelé la transposition didactique.*

de transposição didática deste saber sábio e que foram esquematizadas por Astolfi, Darot, Vogel e Toussaint (2008), da seguinte forma:

Regra n.º 1: Modernizar o saber escolar - Os novos saberes que surgem no âmbito das pesquisas científicas e que são utilizados pelas indústrias e novas tecnologias devem estar contidos nos livros didáticos, criando uma aproximação da produção acadêmica com o que é apresentado na escola;

Regra n.º 2: Atualizar o saber a ensinar - Ao fazer a revisão do currículo deve-se ir além de apenas acrescentar novos saberes. Há a necessidade de se eliminar alguns saberes que, embora corretos, devem ser retirados por estarem vulgarizados;

Regra n.º 3: Articular o saber “novo” com o “antigo”- A introdução de novos saberes deve ser feita de forma articulada com os outros saberes já existentes nos programas de ensino. Negar radicalmente um conteúdo tradicionalmente presente no Sistema de Ensino pode gerar desconfiança por parte dos alunos, sobre o que se deseja que eles aprendam;

Regra n.º 4: Transformar um saber em exercícios e problemas - O saber sábio capaz de gerar uma ampla variedade de exercícios e atividades didáticas tem uma maior probabilidade de ser transposto e se tornar saber a ensinar;

Regra n.º 5: Tornar um conceito mais compreensível - A transposição didática deve permitir a aprendizagem de conceitos, caso contrário, ela não pode ser legitimada.

2.5.3 Marcadores-estruturantes

Segundo Siqueira, Brockington e Pietrocola (2008), após a seleção dos conteúdos ensináveis há a necessidade de os transformar em sequências didáticas possíveis de serem implementadas em sala de aula. Estes autores propõem a noção de marcadores-estruturantes, tendo por base a teoria da transposição didática, para analisar novas propostas de sequências de ensino. Também dão um exemplo como esses marcadores podem ser definidos. Os marcadores são definidos como os principais saberes necessários para estabelecer as ligações entre os vários conceitos constituintes de uma nova estrutura criada. Estes saberes também devem ser aqueles que, quando analisados sob a perspectiva das regras da transposição didática, estarão mais adequados a serem transpostos e, principalmente, mais aptos a sobreviver nas salas de aulas. Contudo, os marcadores, além de demarcar um caminho num campo em exploração, explicitam também atividades estruturadoras — marcadores-estruturantes. Estes autores concluíram que os marcadores-estruturantes revelaram ser de grande utilidade na estruturação de sequências de ensino e associados à transposição didática, permitindo analisar a estrutura criada.

2.5.4 Algumas considerações sobre a transposição didática

Segundo Brockington e Pietrocola (2005), pode-se avaliar que a transposição didática fornece critérios mínimos para se entender a produção e sobrevivência de saberes no Sistema Didático. Em relação à produção de atividades, é importante notar que um saber que sobrevive no Ensino Secundário é aquele que pode ser transformado numa série de exercícios semelhantes, como os que aparecem nos livros didáticos e outros materiais de ensino. No entanto, segundo a transposição didática, a operacionalidade deve ser vista como ligação entre os processos de desenvolvimento das atividades e a avaliação. As atividades devem ser pensadas para que o professor e o aluno sejam capazes de ter consenso sobre o que fazer e como avaliar o resultado das atividades propostas. Segundo os autores, conteúdos modernos devem ser introduzidos através de uma transposição didática centrada em atividades que tenham uma maior ênfase na argumentação filosófica, privilegiando o debate e as características mais qualitativas do conhecimento. Essa perspectiva parece capaz de contornar os obstáculos gerados pelas representações probabilísticas e pelo formalismo matemático, inerentes a essa nova teoria. No entanto, tais atividades encontram resistência no ensino tradicional.

3 Uma proposta didática: fundamentação e descrição

3.1 Fundamentação teórica

A proposta didática foi elaborada para o 12.º ano de escolaridade, procurando estar de acordo com o paradigma construtivista e estar fundamentada na teoria da aprendizagem significativa de David Ausubel, Joseph D. Novak e D. Bob Gowin e na teoria socio-interacionista de Lev Vygotsky (ver capítulo 2, itens 2.1, 2.4 e 2.5).

Os tópicos de física que escolhemos para construir a proposta didática são: experiência de Michelson-Morley; simultaneidade de acontecimentos; dilatação do tempo e contração do espaço, porque entendemos que são saberes que podem ser transformados em sequências didáticas, passíveis de serem implementadas em ambiente escolar. Saberes estes que não se pretendem simplificar, mas que são capazes de responder a dois domínios epistemológicos diferentes: ciência e sala de aula. Também entendemos que a TRR obedece às características, de acordo com as regras da transposição didática, que possibilita a sua sobrevivência como objeto de ensino (ver capítulo 2, item 2.5.2): permite modernizar e atualizar o saber escolar; articular o saber “novo” com o “antigo”; produzir uma ampla variedade de atividades didáticas e tornar alguns conceitos de física mais compreensíveis, por exemplo, os conceitos de tempo, espaço e movimento.

Pretendemos que os materiais de aprendizagem sejam *potencialmente* significativos. Eles foram construídos tendo em conta as dificuldades conceptuais dos alunos, e dos professores, existentes na literatura, e os conhecimentos prévios dos alunos. Acreditamos assim, que estejam adequados à estrutura cognitiva dos alunos e que os motive para aprenderem significativamente, ou seja, que o aprendiz construa o seu próprio conhecimento, integrando-o no que já possui.

A proposta está organizada, de acordo com a Figura 2.4, por aspectos mais gerais, mais inclusivos, mais organizadores do conteúdo e que são progressivamente diferenciados e exemplificados, sendo trabalhados numa perspetiva de diferenciação progressiva e reconciliação integradora, de descer e subir, várias vezes, nas hierarquias conceituais, fazendo simultaneamente a reconciliação horizontal entre os conceitos. Os tópicos a ensinar têm uma sequência que depende naturalmente dos que os antecedem, insistindo nos conhecimentos prévios para que estes sejam consolidados antes de introduzir novos conhecimentos. Como a consolidação não é imediata, demora tempo, a resolução de situações-problema, clarificações, discriminações, diferenciações, integrações são importantes antes de inserir novos conhecimentos. As situações-problema são propostas em níveis crescentes de complexidade, destacando as semelhanças e

diferenças relativamente às situações e exemplos já trabalhados, ou seja, promove a reconciliação integradora.

O professor tem papel fundamental na aplicação do material didático, porque ele é o mediador entre o conhecimento já existente e os novos conceitos. Os alunos têm potencial para absorver os conceitos da TRR, mas é necessário o auxílio do professor para a compreensão de muitos dos conceitos desta teoria. É necessário o diálogo entre o professor e os alunos e também que os alunos trabalhem colaborativamente em pequenos grupos para que os aprendizes *mais capazes* possam auxiliar os outros, seguindo-se a apresentação ou discussão em grande grupo. A disponibilização do material on-line permite ainda que o aluno possa trabalhar, individualmente, ou não, fora do ambiente de sala de aula. As atividades estão construídas para o computador ser utilizado, não apenas como material educativo, mas também como mediador da aprendizagem. Pretende-se que a relação seja quadrática: aluno, professor, material didático e computador.

A avaliação da aprendizagem é feita ao longo da implementação da proposta, registrando tudo que possa ser considerado evidências de aprendizagem significativa do conteúdo trabalhado. Também existe uma avaliação individual onde se propõe questões/situações que implicam a compreensão e que evidenciam captação de significados e alguma capacidade de transferência.

3.2 Descrição da proposta

Os materiais preparados que constam desta proposta podem ser associados a outros materiais já existentes, como por exemplo o manual escolar, pequenos filmes, textos de livros científicos e artigos científicos. Eles constam de uma síntese da abordagem didática, slides em formato pdf e formato ppt, teste com filmes e simulações em Geogebra disponíveis em <https://sites.google.com/site/sobreattr/>. Para uma melhor visualização dos documentos referidos neste subcapítulo, sugerimos a consulta dos pdf disponíveis neste site.

Como já foi referido, os tópicos da proposta didática são: experiência de Michelson-Morley, simultaneidade de acontecimentos, dilatação do tempo e contração do espaço.

3.2.1 A Experiência de Michelson-Morley (1887)

A proposta começa por uma abordagem histórica recuando até à segunda metade do século XIX, em que a comunidade científica acreditava que as ondas de luz se propagavam através de um material misterioso — o éter. De seguida, aborda a famosa experiência que Albert Michelson e Edward Morley conceberam para determinar a velocidade da Terra em relação ao éter, utilizando sinais luminosos (na Terra), de acordo

com a regra da adição de velocidades de Galileu. A Figura 3.1 mostra como fazemos a descrição e a simplificação do dispositivo construindo por eles para esse fim.

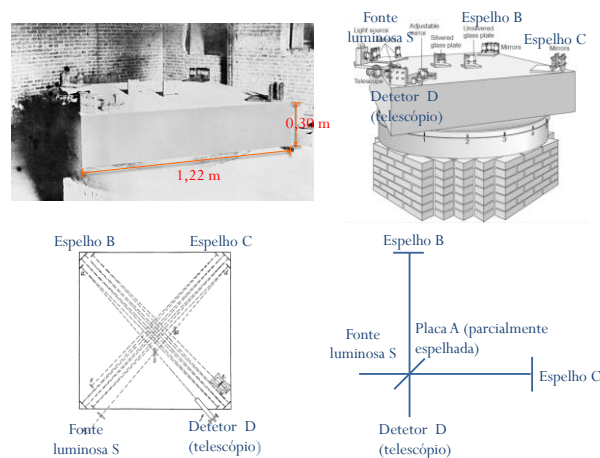


Figura 3.1 Imagem do Inferómetro de Michelson- Morley e respetivos esquemas.

A Figura 3.2 mostra uma sequência de slides da descrição e explicação da experiência de acordo com a relatividade galileana.

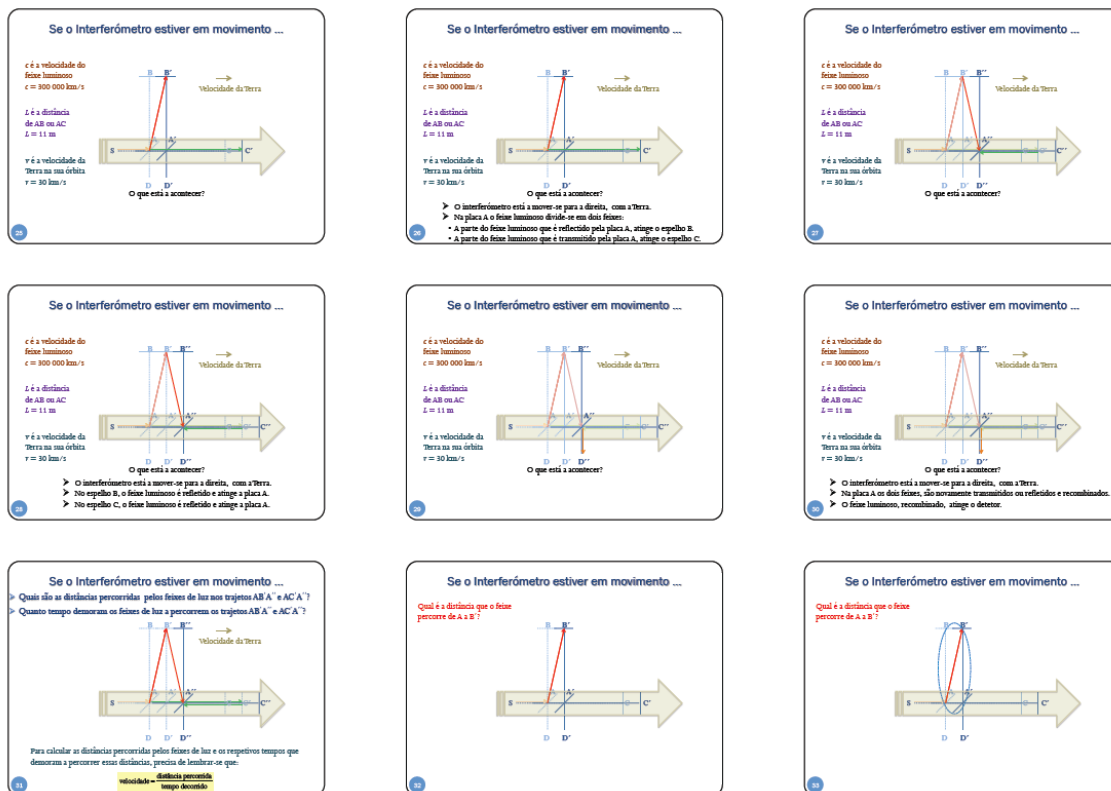


Figura 3.2 Sequência de slides da descrição e explicação da experiência de Mickelson-Morley

O resultado negativo da experiência foi um desapontamento não apenas para os autores, mas também para a comunidade científica que percebeu a existência de algo errado na explicação teórica. Destacamos dois importantes cientistas, Hendrik Antoon Lorentz e Henri Poincaré, que tiveram um papel importante na história da relatividade restrita, mas que nunca a aceitaram totalmente. Eles falharam a descoberta da TRR porque estavam demasiado presos às considerações dinâmicas da mecânica clássica. Só Einstein viu o novo ponto de vista crucial: o abandono da dinâmica do éter não era necessário, bastava uma nova cinemática baseada em dois novos postulados. As transformações de Lorentz, portanto a contração de Lorentz-Fitzgerald, podiam ser deduzidas a partir de argumentos cinemáticos. Apesar da controvérsia gerada nos círculos científicos da época, Planck e uma nova geração de teóricos reconheceram prontamente que a TRR ficava completamente especificada pelos dois princípios enunciados por Einstein no artigo de 1905.

A TRR amplia o postulado da relatividade de Galileu, incluindo não só as leis da mecânica, mas também as do eletromagnetismo e resolve o problema da incompatibilidade da eletrodinâmica de Maxwell-Lorentz com a mecânica clássica (regra da adição das velocidades de Galileu). Relativamente às consequências, elas são várias, nomeadamente, a necessidade da existência do éter desaparece, os acontecimentos são estudados a quatro dimensões (x, y, z, t), a velocidade limite, c , o tempo e o espaço são relativos.

Trata-se de uma teoria que não tem base empírica, isto é, sua formulação não é obtida a partir da experiência e que pode contrastar com a possível concepção empírico-indutivista dos alunos a respeito da construção do conhecimento científico.

Defendemos que a abordagem sob esta perspectiva propicia ao aluno uma compreensão mais crítica e abrangente do trabalho científico, contribui para instigar o pensamento crítico, criar uma cultura mais ampla, promover o interesse pelas aulas, compreender melhor os conceitos científicos e lidar com a problemática das concepções alternativas.

3.2.2 Simultaneidade dos Acontecimentos

Os conceitos da TRR não são por nós percebidos porque as velocidades às quais estamos acostumados são muito pequenas frente à velocidade da luz. Por isso, iniciamos este tópico, trabalhando diversas escalas para os alunos perceberem a necessidade de se recorrer a *experiências imaginadas*, uma tradição que já vem de Galileu e que Einstein também usou.

A experiência imaginada utiliza uma carruagem a mover-se com uma velocidade da ordem de grandeza da velocidade da luz. Distinguimos: os referenciais, os observadores e os acontecimentos da experiência imaginada e recorreremos a múltiplas representações, incluindo a construção dos diagramas de espaço-

tempo, para explicar que os acontecimentos podem ser simultâneos num referencial e não o ser noutra referencial.

A Figura 3.3 mostra como a partir da explicação da simultaneidade dos acontecimentos utilizando representação dos referenciais fixo e móvel fazemos a transição para a construção de outra representação da mesma situação utilizando os diagramas de espaço-tempo.

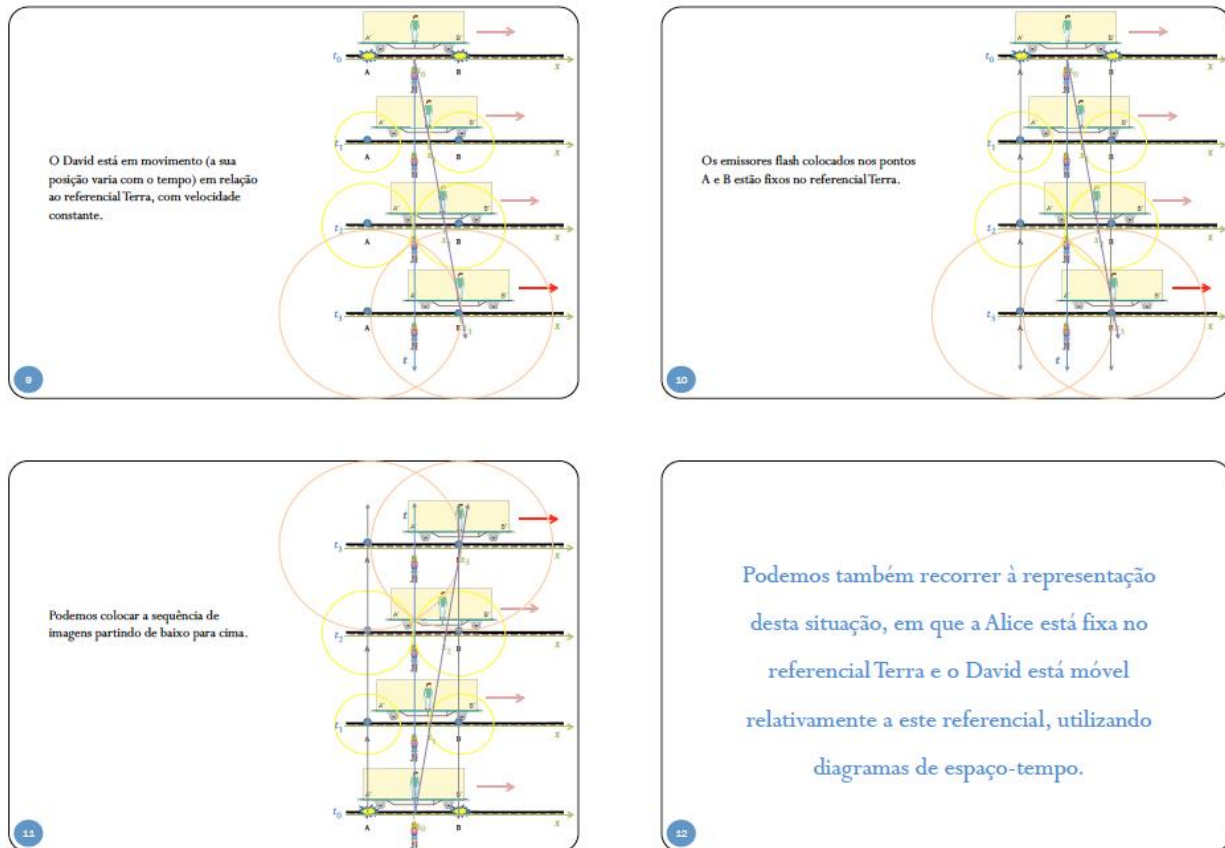


Figura 3.3 Sequência de slides para explicar a simultaneidade dos acontecimentos

A Figura 3.4 mostra a construção dos diagramas de espaço-tempo, conceptualmente mais complexo, e a ligação com os conhecimentos anteriores.

Simultaneamente podemos utilizar o *software Geogebra* para manipulação direta das linhas do mundo dos diagramas de espaço-tempo, verificando o que significa aumentar ou diminuir a velocidade da carruagem e como se lê as coordenadas de um ponto no referencial fixo e no referencial em movimento.

A exploração integral dos slides da simultaneidade dois e três, nomeadamente no que respeita à leitura de valores nos diagramas espaço-tempo, obriga a manter a condição do intervalo de espaço-tempo invariante. O professor poderá optar por não fazer esta exploração, fazendo a abordagem apenas qualitativa.

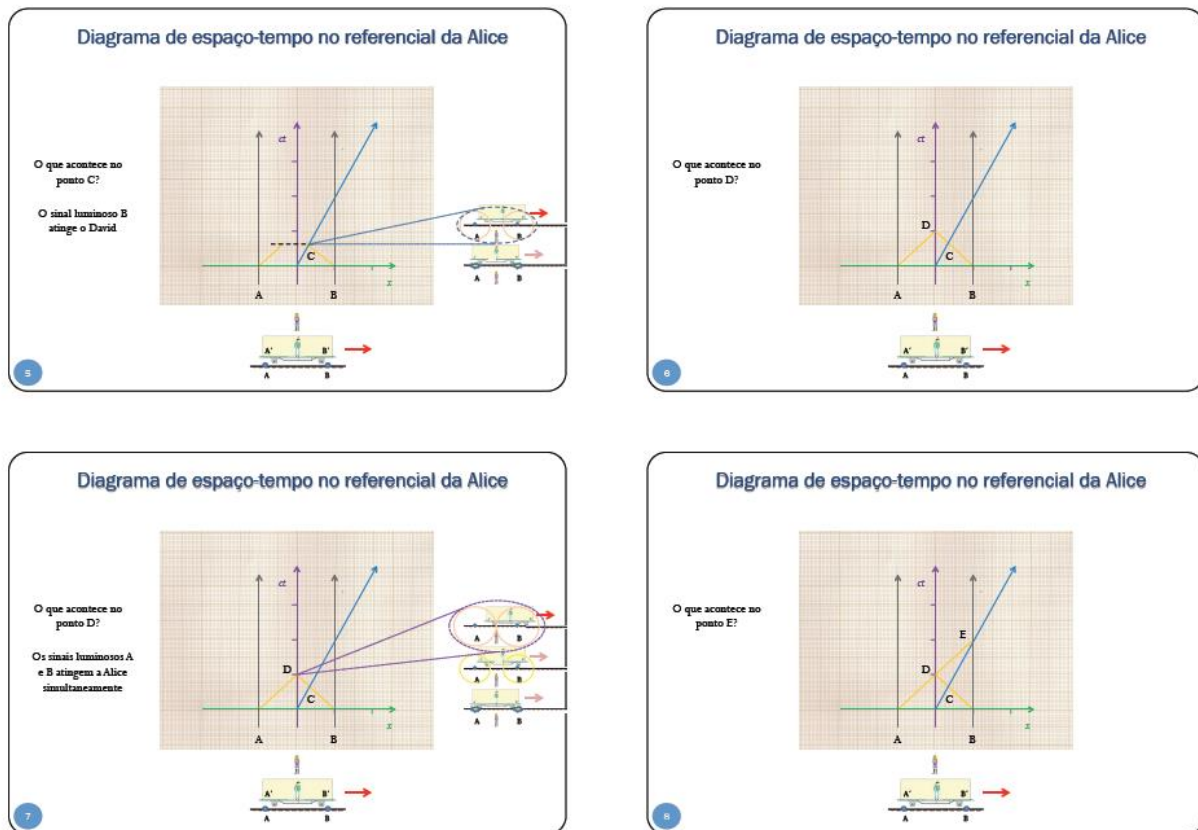


Figura 3.4 Sequência de slides da construção do diagrama espaço-tempo

3.2.3 Dilatação do Tempo

Neste tópico, pretendemos explicar como o tempo medido num referencial varia em relação ao tempo medido noutro referencial. À semelhança da simultaneidade dos acontecimentos, recorreremos a uma experiência imaginada e construímos diferentes representações para estudar esta situação.

A Figura 3.5 mostra uma sequência de slides em que fazemos a transição da representação dos referenciais fixo e móvel para uma representação esquemática, permitindo chegar à expressão matemática que relaciona os dois tempos medidos em referenciais diferentes.

Não apresentamos o diagrama de espaço-tempo, porque esta situação tem mais uma dimensão a considerar (x , y , t) e é difícil de abordar.

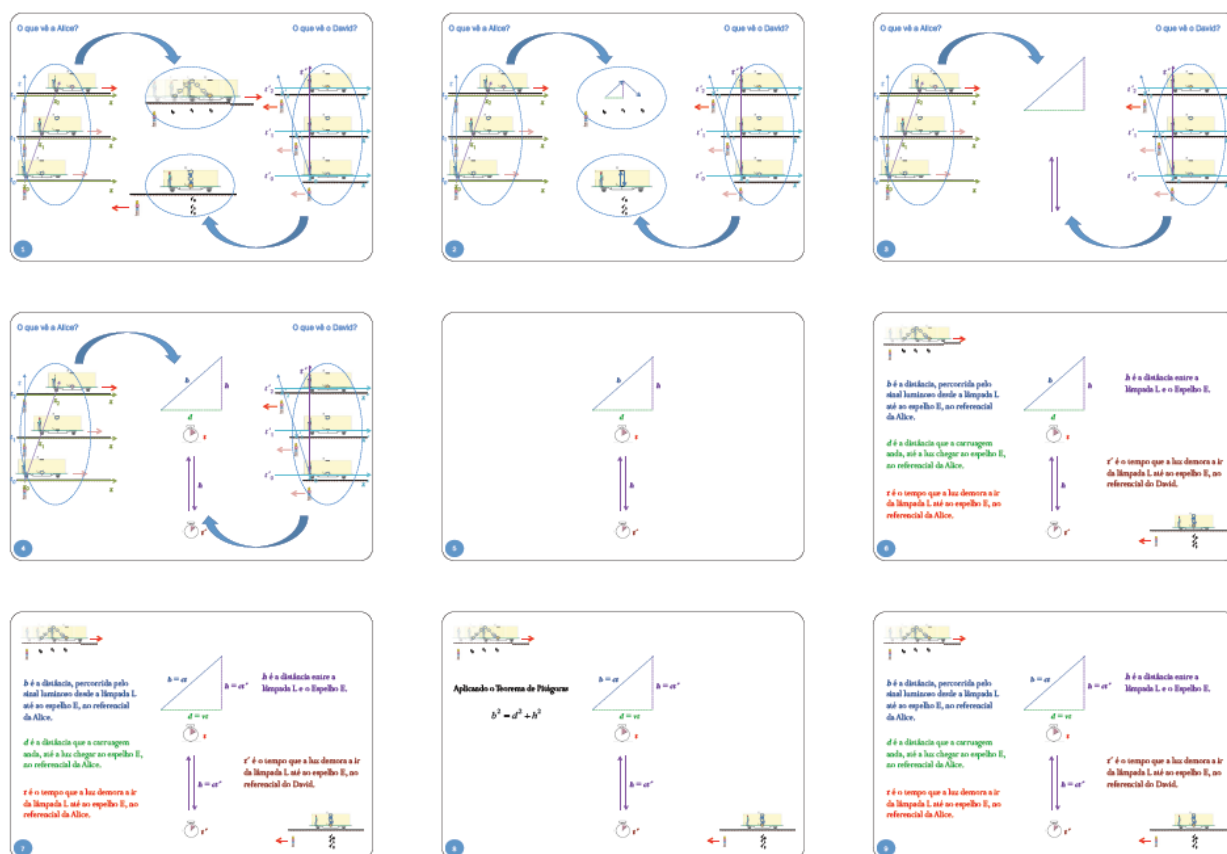


Figura 3.5 Sequência de slides para explicar a relação entre os tempos medidos em referenciais diferentes

3.2.4 Contração do Espaço

Neste tópico, pretendemos explicar como o comprimento de um corpo varia de referencial para referencial. À semelhança da simultaneidade dos acontecimentos e da dilatação do tempo, recorremos a uma experiência imaginada e construímos diferentes representações para estudar esta situação. Também fazemos a transição da representação dos referenciais fixo e móvel para uma representação esquemática, possibilitando chegar à expressão matemática que relaciona os dois comprimentos medidos em referenciais diferentes.

A Figura 3.6 mostra uma sequência de slides em que fazemos novamente a relação entre os comprimentos medidos em referenciais diferentes, utilizando o diagrama de espaço-tempo. Esta representação também pode ser acompanhada pelo exemplo que construímos com o *software Geogebra* (Figura 3.7) para modelar a situação.

Qual a relação entre os comprimentos da carruagem medidos pela Alice e pelo David?

13

Qual é a relação entre os comprimentos da carruagem medidos pela Alice e pelo David?

O sinal luminoso atinge o espelho E

14

Qual é a relação entre os comprimentos da carruagem medidos pela Alice e pelo David?

O sinal luminoso atinge o espelho E

$\frac{v}{c} = 0,9$

15

Qual é a relação entre os comprimentos da carruagem medidos pela Alice e pelo David?

O sinal luminoso atinge o espelho E

$\frac{L}{L'} = 0,9$ de acordo com o valor encontrado pela equação da contração do espaço.

16

Figura 3.6 Sequência de slides para explicar a relação entre os comprimentos da carruagem medidos em referenciais diferentes

A atividade com o *Geogebra* permite reificar conceitos, isto é, concretizar os objetos abstratos, no sentido que são representações de ideias ou relações, conferindo-lhe o estatuto de “objetos diretamente manipuláveis”, no sentido que podem ser diretamente manipuláveis no computador. Podemos ir construindo o diagrama de espaço-tempo: colocar os eixos dos referenciais fixo e móvel, a linha do mundo do sinal luminoso e do espelho, alterar a velocidade da carruagem em relação à velocidade da luz, alterar a distância do espelho à lâmpada e estudar a implicações resultantes destas manipulações.

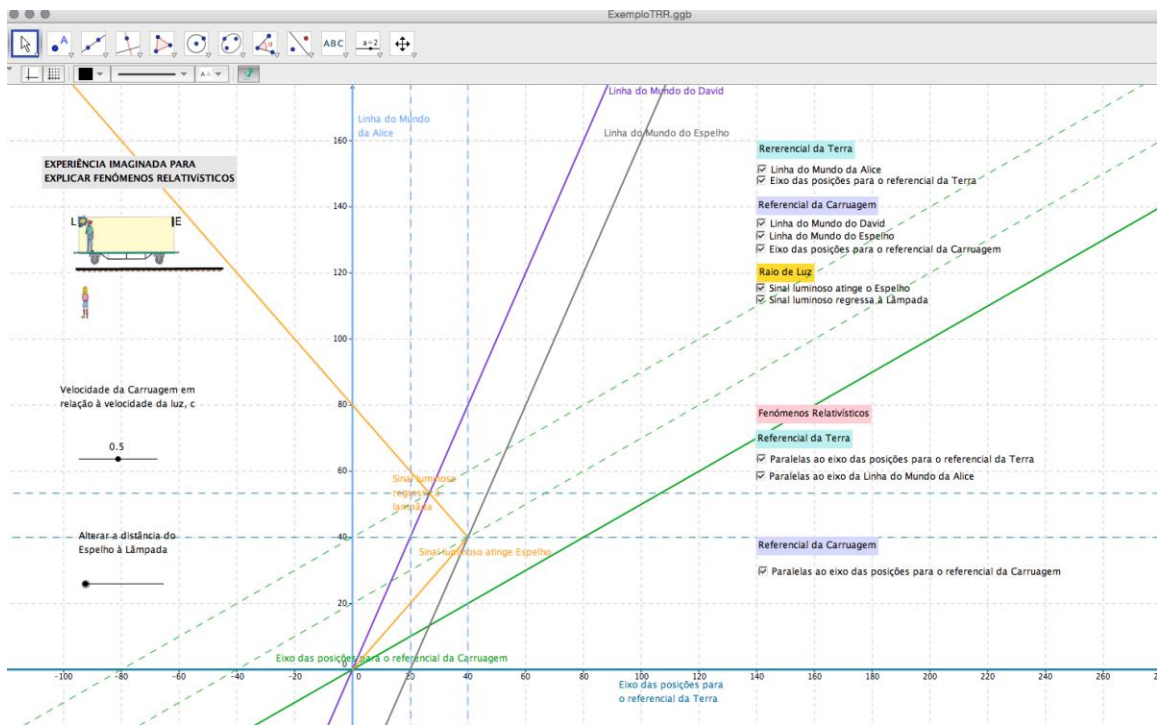


Figura 3.7 Animação criada no *software Geogebra* de um diagrama espaço-tempo

Esperamos ter clarificado como construímos a sequência didática, pretendendo reproduzir o processo de pensamento, diminuir a carga cognitiva, promover a discussão com pequenas questões e utilizar múltiplas representações da mesma situação, de forma a que possamos trabalhar a diferenciação progressiva e a reconciliação integradora, consolidando os novos conhecimentos aos anteriores.

O número de slides é elevado mas, desta forma, o aluno, ou professor, pode optar por avançar mais rapidamente e navegar pela proposta, de acordo com o seu ritmo de aprendizagem.

O *diagrama em V* representado na Figura 3.8, esquematiza o processo de construção da proposta didática. Na parte central deste diagrama estão a questão de investigação e as subquestões, que orientaram o nosso trabalho. No vértice do V, estão os acontecimentos (construção da proposta didática potencialmente significativa) que irão responder às questões de investigação e que estão intimamente interligados aos dois lados do V. O lado esquerdo do V refere-se ao domínio conceptual e o lado direito do V, o domínio metodológico, existindo uma permanente interação entre os dois lados de modo que tudo o que é feito no lado metodológico é guiado por conceitos, princípios, teorias e filosofia do lado conceptual.

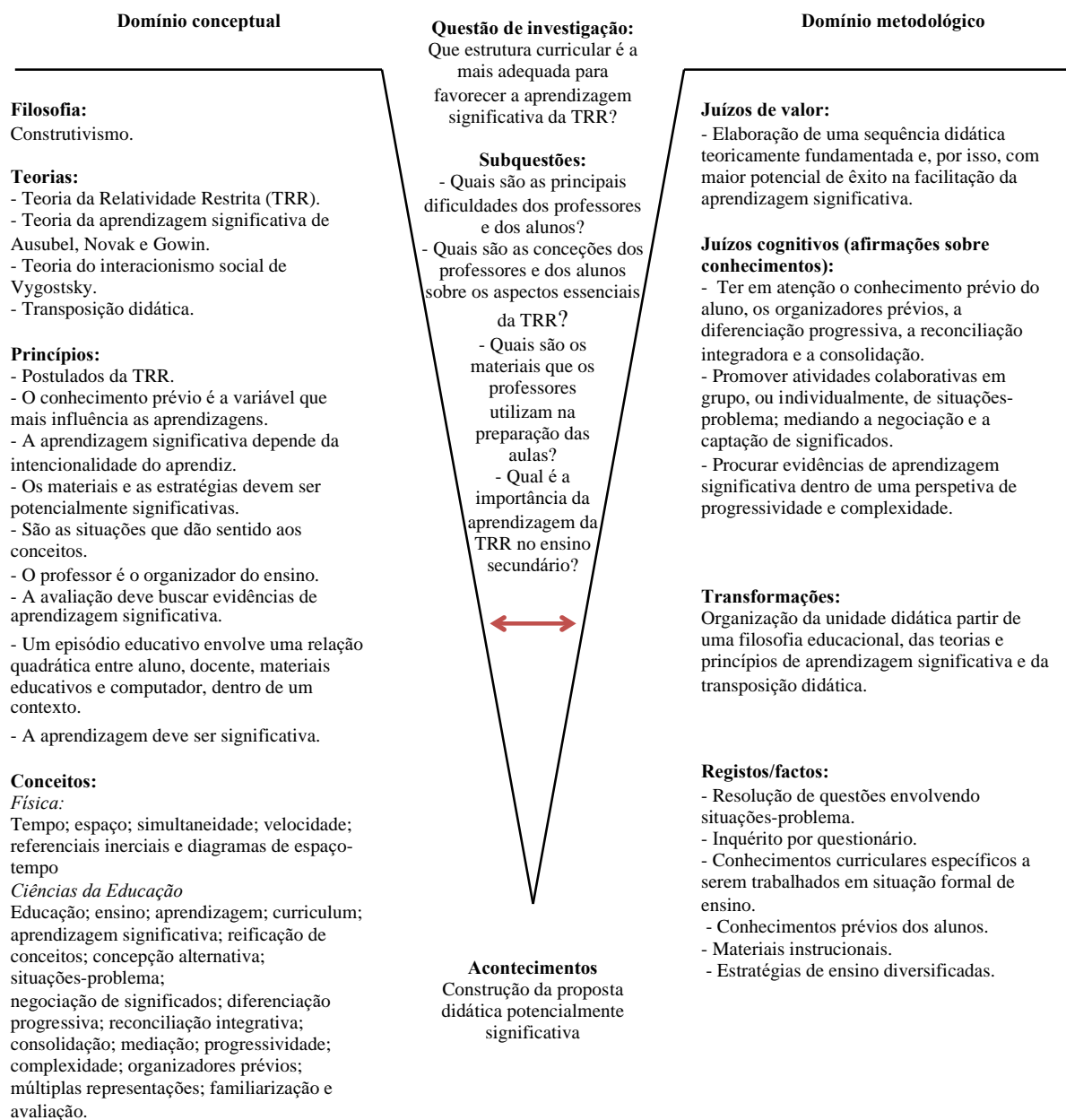


Figura 3.8 *Diagrama em V* da proposta didática.

4 Dois estudos de caso

Neste trabalho, elaboramos dois instrumentos investigativos para a recolha de dados de uma amostra de conveniência não aleatória, de forma a responder às nossas questões de investigação.

Realizamos uma pesquisa e análise da literatura publicada em revistas científicas e em dissertações, em documentos e em livros, das dificuldades conceituais existentes nos alunos e nos professores e das propostas didáticas. Com base neste estudo, elaboramos uma proposta didática da TRR, onde abordamos a experiência de Michelson–Morley, numa perspetiva histórica e experimental, a simultaneidade de acontecimentos, a dilatação do tempo e a contração do espaço.

Um dos instrumentos investigativos, teste (Anexo I), foi aplicado a professores e alunos para verificar se as concepções no ensino da TRR eram semelhantes às detetadas em outros estudos.

O outro instrumento investigativo, inquérito por questionário (Anexo II), foi aplicado a professores com o objetivo de avaliar do ensino da TRR e a proposta didática elaborada sobre esse ensino, pretendendo responder a algumas questões deste estudo:

- Que estrutura curricular é adequada à aprendizagem da TRR?
- Qual é a importância da aprendizagem da TRR no ensino secundário?
- Quais são as principais dificuldades dos professores?
- Quais são os materiais que os professores utilizam na preparação das aulas?

Também realizamos um inquérito por questionário a alunos (Anexo III), como objetivo de avaliar do ensino da TRR e a proposta didática elaborada sobre esse ensino, pretendendo responder a algumas questões deste estudo:

- Quais são as principais dificuldades dos alunos?
- Qual é a importância da aprendizagem da TRR no ensino secundário, para os alunos?

4.1 Estudo com professores

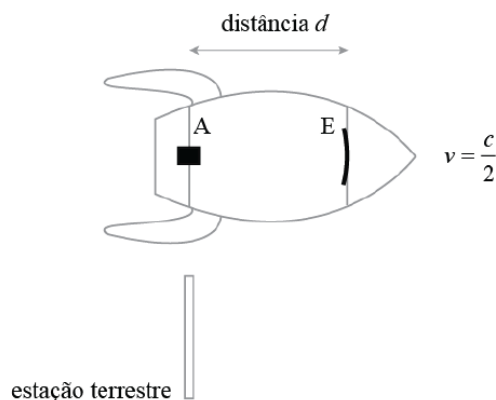
4.1.1 Metodologia e participantes

O teste é constituído por duas situações problema, com sete questões, que foram adaptadas dos testes aplicados pelos investigadores Villani e Pacca (Villani & Pacca, 1987; 1990) a estudante graduados em Física, e Valadares (Valadares, 1995) a professores. Este teste foi validado por dois professores especialistas da área. A Figura 4.1 mostra uma das questões.

*As respostas às questões são confidenciais e impessoais.
As suas respostas devem traduzir o mais fielmente possível as suas ideias.
Dê a devida importância à fundamentação escrita da resolução das questões para tornar evidente o seu pensamento.*

Questão 4

Uma nave possui uma antena A na extremidade traseira e um espelho E na sua extremidade dianteira. A distância entre a antena A e o espelho E é d .
A nave viaja a uma velocidade $v = c/2$ e passa por cima de uma estação terrestre, na vertical.
Nesse instante, a antena A emite um sinal luminoso.
O sinal atinge o espelho E, é refletido e regressa à antena A.



Para alguém que viaje na nave, o sinal luminoso demora mais tempo a ir da antena A ao espelho E ou a regressar do espelho E à antena A? Porquê?

Figura 4.1 Teste para avaliar as concepções da TRR

O teste foi aplicado na última sessão dedicada à TRR, de um seminário de formação de professores de Física e Química do 3.º Ciclo e Secundário. Os nove professores, amostra de conveniência não aleatória, realizaram um teste no início da sessão (durante 40 minutos) e o mesmo teste no final desta (durante 30 minutos). A sessão sobre a TRR consistiu na exploração da atividade de Michelson-Morley, numa perspetiva histórica e experimental, em formato pdf, que faz parte da proposta didática que elaboramos e de dois filmes.

O inquérito por questionário aplicado a professores, foi construído em formato digital, pdf interativo, de forma a que o inquirido ao responder ao questionário pudesse navegar livremente pelos diversos materiais didáticos produzidos. Este questionário foi validado por três professores especialistas da área. O exemplo de uma página deste questionário está representado na Figura 4.2.

2 Sobre a proposta didática apresentada

7. Qual é a avaliação global que faz da proposta didática (1 discorda totalmente, 10 concorda totalmente)?

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Permite a reflexão sobre a importância da história da ciência na sua aprendizagem.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Apresenta a evolução histórica dos conceitos mais importantes.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Realça concepções errôneas históricas.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Possibilita a discussão de mudanças do conhecimento científico.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Proporciona uma perspectiva da ciência como um processo social em construção.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Refere os cientistas que se distinguiram na construção dos conhecimentos tratados.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Contribui para uma visão crítica da ciência e do seu desenvolvimento.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Em temas de conteúdo foram contemplados os conceitos fundamentais da TRR.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
A sequência das atividades é adequada.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
A estratégia, pela forma e conteúdo, ajuda a motivar os alunos para a aprendizagem da Física.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Se necessário, utilize o espaço seguinte para expressar outro qualquer aspeto referente a este item:

“Link” para a sequência didática

8. Qual é a avaliação que faz da abordagem da experiência Michelson-Morley, na proposta didática (1 discorda totalmente, 10 concorda totalmente)?

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A exploração da experiência de Michelson-Morley é indispensável nesta temática.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Está adequada aos conhecimentos prévios dos alunos.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
As atividades são suficientemente diversificadas e apelativas para interessar os alunos.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
A sequência das atividades é adequada.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
A sequência de atividades apresenta complexidade crescente, tendo em cada passo uma exploração e análise pormenorizada.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
A sequência reforça o desenvolvimento de competências específicas antes de competências gerais.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
As múltiplas representações facilitam a construção de relações entre essas representações de forma a corrigir erros e a consolidar a aprendizagem do aluno.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
As questões colocadas auxiliam o aluno no processo de reflexão crítica facilitando a sua aprendizagem sobre o tema.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Se necessário, utilize o espaço seguinte para expressar outro qualquer aspeto referente a este item:

“Link” para a abordagem da Experiência de Michelson-Morley

Figura 4.2 Questionário para avaliar o ensino da TRR e a proposta didática sobre esse ensino.

O convite para participar neste inquérito foi enviado por email e divulgado no *facebook*, no grupo fechado de professores de Física e Química. Recebemos trinta e cinco respostas, no email, de pessoas disponíveis para participar. Enviamos o endereço da página web construído para o efeito, onde disponibilizamos o questionário e todo o material construído sobre a TRR. Após um prazo limite de aproximadamente três meses, obtivemos doze respostas, sendo uma delas apenas um comentário. Talvez por ser um trabalho moroso, não foram obtidas mais respostas.

4.1.2 Resultados e análise dos resultados do teste⁹

Analizamos as respostas dos testes em termos qualitativos e quantitativos. Em termos qualitativos tentamos separar os raciocínios baseados na TRR, na relatividade galileana (RG) e no pensamento espontâneo (PE). Em termos quantitativos, a Tabela 4.1 mostra os resultados das respostas corretas (com a

⁹ Este estudo foi apresentado no “VII Encuentro Internacional sobre Aprendizaje Significativo. V Encuentro Iberoamericano Sobre Investigación en Enseñanza de las Ciencias”, que decorreu em Burgos, em julho de 2015 (Rodrigues, 2015).

justificação completa, incompleta, sem justificação e com justificação errada) e as respostas erradas de acordo com a RG ou PE, nos pré-testes e nos pós-testes. Nesta tabela não distinguimos as justificações incorretas de acordo com RG ou PE e também não diferenciamos as respostas que misturam a RG com o PE, classificando-as apenas como PE. A tabela mais completa encontra-se em anexo (Anexo V).

Tabela 4.1 Resultados do pré-teste e do pós-teste sobre as concepções da TRR (professores)

Questões	Teoria da Relatividade Restrita		Relatividade Galileana		Pensamento Espontâneo	
	Pré	Pós	Pré	Pós	Pré	Pós
1	8 a) e 1 b)	8 a) e 1 b)				
	7 a) e 1 b)	7 a) e 1 b)			1	1
	6 a) e 1 b)	5 a) e 1 b)			2	3
2	1 a) e 1 d)	1 d)	6	7	1	1
3	1 a) e 1 d)	1 d)	6	7	1	1
4	6 a)	7 a)			3	2
5	4 a) e 1 c)	4 a) e 1 c)	1	1	3	3
6	2 a) ; 1 c) e 2 d)	2 a) e 4 d)			3	2
7	2 a)	2 a) ; 1 b) e 1 c)			5	5

a) Justificação completa; b) Justificação incompleta; c) Sem justificação; d) Justificação errada.

Primeira situação problema

Duas naves espaciais, N_A e N_B , viajam com a velocidade $v = c/2$, em sentidos opostos ao longo da mesma linha reta. “ c ” representa a velocidade da luz no vácuo. Quando passam pela antena A_1 , esta emite um sinal luminoso L_B no sentido em que viaja a nave N_B e, simultaneamente, outro sinal luminoso L_A no sentido em que viaja a nave N_A .

Questão 1- Comparação das distâncias percorridas entre A_1 e N_A , A_1 e N_B , A_1 e L_A

De um modo geral os participantes respondem à questão e justificam-na corretamente de forma qualitativa ou utilizando expressões. Existe uma resposta em que a distância N_B a A_1 está errada porque considera “ $3/2 d$ de A_2 ” em vez de ser em relação a A_1 . Outra resposta que não distingue a distância d , distância de A_1 a A_2 , das outras distâncias e na distância de N_B a A_1 considera $d = (c \times t)/4$, sem justificação. E ainda uma resposta, no pós-teste, em que faz uma soma de distâncias de A_1 a N_B incorreta.

As respostas incorretas revelam a tendência para a utilização não apropriada de expressões, raciocínios formais incorretos, em detrimento de raciocínios intuitivos eficazes, à semelhança dos observados por Valadares (1995).

Questão 2 – Distância percorrida pelos sinais L_A e L_B em relação N_B

A maioria das respostas considera implicitamente o referencial terrestre como o referencial privilegiado. Como exemplo mostramos duas respostas tipo:

“Distância diferente. O sinal L_B desloca-se no mesmo sentido da nave N_B e o sinal L_A desloca-se no sentido oposto”.

“Distâncias diferentes. O sinal L_B encontra-se à distância d de A_1 e à distância $d/2$ da nave N_B ; o sinal L_A encontra-se à distância $3/2 d$ da nave N_B ”.

No entanto, distinguimos a primeira resposta da segunda considerando que esta última revela um raciocínio galileano que supõe um referencial absoluto (Terra) onde a luz tem a mesma velocidade em todas as direções, apesar de não ser muito claro, pois considera-o como um referencial privilegiado. Situação que não está clara na primeira resposta e que levou Valadares a classificá-la como sendo um pensamento espontâneo, em que existe a ideia do veículo a perseguir a luz.

Um participante escreve em pré-teste:

“Distância diferente. Como viajo na nave N_B acompanho juntamente com N_B a distância que N_B percorre”.

E depois em pós-teste:

“Viajando na nave N_B , os sinais L_A e L_B estão à mesma distância de mim, apesar de eu viajar na N_B ”.

Apesar de tentar aplicar a relatividade continua a ter um pensamento espontâneo utilizando o referencial terrestre como um referencial absoluto privilegiado.

Questão 3 – Distância percorrida pelos sinais L_A e L_B em relação N_A

As respostas a esta questão estão de acordo com as da questão anterior.

Segunda situação problema

Uma nave possui uma antena A na extremidade traseira e um espelho E na sua extremidade dianteira. A distância entre a antena A e o espelho E é d . A nave viaja a uma velocidade $v = c/2$ e passa por cima de uma estação terrestre, na vertical. Nesse instante, a antena A emite um sinal luminoso. O sinal atinge o espelho E, é refletido e regressa à antena A.

Questão 4 – Comparação dos tempos decorridos entre A e E e entre E e A em relação à nave

Nesta questão, as respostas incorretas consideram que o sinal luminoso demora mais tempo a ir de A a E e as justificações que predominam são:

“Demora mais tempo a ir da antena A ao espelho E porque o espelho se encontra a afastar da antena. O sinal de regresso à antena A demoraria menos tempo porque antena se aproxima do espelho encurtando a distância a ser percorrida pelo sinal luminoso”.

“Demora mais tempo a ir de A a E. A nave e o sinal viajam no mesmo sentido. A distância que o sinal percorre é maior do que d ”.

Como a antena não se move no referencial em questão estamos perante um raciocínio espontâneo que assenta num referencial absoluto.

Questão 5 – Comparação dos tempos decorridos entre A e E e entre E e A em relação à estação terrestre

Nesta questão, as respostas incorretas consideram que o sinal luminoso demora mais tempo a ir de E a A e a justificação que predomina é:

“Mais tempo de E a A. A nave está a afastar-se do observador e o sinal chega-lhe em *diferido*”.

Mostrando que existe dificuldade em distinguir a ocorrência de um acontecimento e a perceção do acontecimento pelo observador num referencial.

Existe um participante que soma algebricamente as velocidades de A a E, ultrapassando c , e de E a A subtrai as velocidades, indicando um raciocínio baseado na composição de velocidades.

Questão 6 – Comparação dos tempos decorridos entre A e E em relação à estação terrestre e à nave

Mostramos exemplos de algumas respostas e das suas justificações:

“Mais tempo de A a E, para a estação terrestre. Distância entre o observador e o sinal aumenta”

Esta resposta é coerente com uma das respostas à questão anterior, em relação ao papel do observador.

“Mais tempo de A a E, para alguém na nave, porque a velocidade com que o sinal se desloca para o observador na nave é c e para o observador na estação terrestre é $c + 1/2 c$ ”

Neste caso é aplicada a relatividade galileana na soma das velocidades e o pensamento espontâneo ao considerar a distância percorrida igual nos dois referenciais, mostrando um raciocínio híbrido.

Questão 7 – Comparação dos tempos decorridos entre E e A em relação à estação terrestre e à nave

Mostramos exemplos de algumas respostas e das suas justificações:

“O sinal luminoso demora mais tempo a percorrer a distância do espelho E à antena A (sinal refletido) para alguém na estação terrestre pois a $v = 1/2 c$ e para alguém da nave $v = c$ ”.

“Mais tempo de E a A, para quem está na estação terrestre. A distância é maior”.

“Mais tempo de E a A, para quem está na estação terrestre. Porque é necessário somar o tempo envolvido no regresso à estação terrestre”.

As respostas a esta questão, estão coerentes com as respostas às questões anteriores.

Existe ainda, uma resposta comum às questões 5, 6 e 7:

“Independentemente do referencial o sinal demora o mesmo tempo”.

Esta resposta mostra a ideia de uma distância percorrida pelo sinal luminoso é absoluta, pressupondo um raciocínio espontâneo.

4.1.3 Algumas conclusões do teste

Da análise dos resultados dos testes realizados aos professores portugueses de Física e Química, identificamos características que estão presentes nos trabalhos de Villani e Pacca, sobre estudantes brasileiros, e de Valadares, também aplicados a professores portugueses, bem como na literatura em geral. Assim, verificamos:

- Pequenas diferenças entre os pré-testes e os pós-testes dos professores, revelando que a sessão foi insuficiente para “relembrar” os conceitos da TRR, provavelmente provocando um conflito cognitivo entre a incompatibilidade das suas crenças e os conceitos relativistas einsteinianos, como identificou Scherr, Shaffer e Vokos (2002) com estudantes;
- A existência do aumento do número de respostas incompatíveis com os conceitos relativísticos quando se muda de um referencial terrestre (questão 1) para um referencial em movimento (questões 2 e 3);
- Nas respostas corretas, os raciocínios são por vezes incompletos ou misturados com noções do pensamento espontâneo;
- A existência de dificuldades na mudança de referencial e no papel do observador no referencial;
- A presença de concepções do tempo, espaço e movimentos absolutos;
- A utilização do carácter infinito da velocidade da luz.

Os resultados sugerem a construção de um quadro conceptual em que coexistem as ideias espontâneas e os raciocínios relativistas, einsteinianos e galileanos.

4.1.4 Resultados e análise dos resultados do questionário

Como já referimos, obtivemos doze respostas, sendo uma delas apenas um comentário de um professor universitário da inadequação do ensino da TRR a alunos pré-universitários referindo que:

“A Física já tem uma percepção negativa que baste e o seu ensino para a cidadania deve focar-se nas situações diárias facilmente compreendidas pela população escolar. A "Física Moderna" deve por isso ser abordada nos tópicos mais básicos e com potencial de aplicação prática (ex. do efeito fotoelétrico ou do deslocamento radiativo).”

Deste modo, analisamos apenas onze questionários. Os dados destes questionários em formato pdf foram transpostos para um ficheiro *Excel* onde foi feito o tratamento estatístico, que permitiu a construção das tabelas seguintes.

Caracterização dos participantes

Todos os participantes, nove do sexo feminino e dois do sexo masculino, possuem formação superior em Física, tendo maioritariamente mestrado pré-Bolonha (54,5 %), como mostra a Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Habilitações académicas

	N	%
Bacharelato	0	0,0
Licenciatura pré-Bolonha	1	9,1
Licenciatura pós-Bolonha	0	0,0
Pós-Graduação	0	0,0
Mestrado pré-Bolonha	6	54,5
Mestrado pós-Bolonha	1	9,1
Doutoramento em área científica	1	9,1
Doutoramento em área educacional	2	18,2
Pós-Doutoramento	0	0,0
Outra:	0	0,0
Total	11	100,0

Relativamente à situação profissional (Tabela 4.3), a maioria está a lecionar ou em contacto com o ensino e aprendizagem da Física, dado que na opção *outra situação* (45,5 %), corresponde a professores reformados (1), do ensino superior (2) ou não colocados (2), estes últimos dão explicações de Física e Química.

Tabela 4.3 Situação profissional

Situação profissional	N	%
Professor do Quadro de Agrupamento/Escola (PQA/PQE)	4	36,4
Professor de Quadro de Zona Pedagógica (PQZP)	0	0,0
Professor Contratado	2	18,2
Outra situação (aposentado, etc.)	5	45,5
Total	11	100,0

Na Tabela 4.4, podemos observar que pelo menos sete professores lecionaram 12.º ano de Física, dos quais seis (54,5 %) lecionaram o novo programa, que inclui a TRR.

Tabela 4.4 Tempo de leção das disciplinas de Ciências Físico-Químicas, Física e Química A e Física de 12.º ano, ou disciplinas equivalentes.

	1 a 5 anos	6 a 14 anos	15 a 24 anos	Mais 25 anos
Ciências Físico-Químicas no ensino básico (ou equivalente)	1	4	4	0
Física e Química A no ensino secundário (ou equivalente)	1	4	1	3
Física no 12.º ano, incluindo os últimos 8 anos (programa em vigor)	3	3	1	0
Física no 12.º ano, apenas nos últimos 8 anos (programa em vigor)	6	0	-	-

Na Tabela 4.5, sete professores têm mais de quinze anos de serviço (63,6 %), um com menos de cinco anos e três sem tempo de serviço no ensino.

Tabela 4.5 Tempo de serviço em 31 de agosto de 2013

	1 a 5 anos	6 a 14 anos	15 a 24 anos	Mais 25 anos
Tempo de serviço em 31 de agosto de 2013	1	0	3	4

Avaliação da proposta didática

Nas Tabelas 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10, mostramos os resultados obtidos da avaliação dos participantes, à proposta didática elaborada, por itens definidos, numa escala de 1 a 10 (1 discorda totalmente, 10 concorda totalmente) e também, a média, a moda e o desvio padrão desses valores. Para cada questão, alguns participantes referem outros aspectos que não estão contemplados nos itens.

A Tabela 4.6 contempla os resultados da avaliação global da proposta didática.

Tabela 4.6 Avaliação global da proposta didática (1 discorda totalmente, 10 concorda totalmente)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média	Moda	Desvio padrão
Em termos de conteúdo foram contemplados os conceitos fundamentais da TRR.								3	3	5	9,2	10	0,9
Refere os cientistas que se distinguiram na construção dos conhecimentos tratados.								2	5	4	9,2	9	0,8
A sequência das atividades é adequada.							2	1	3	5	9,0	10	1,2
Apresenta a evolução histórica dos conceitos mais importantes.						1		1	6	3	8,9	9	1,1
Proporciona uma perspectiva da ciência como um processo social em construção.						1		4	2	4	8,7	10	1,3
Permite a reflexão sobre a importância da história da ciência na sua aprendizagem.							2	2	4	3	8,7	9	1,1
Possibilita a discussão de mudanças do conhecimento científico.						1		3	4	3	8,7	9	1,2
Contribui para uma visão crítica da ciência e do seu desenvolvimento.							2	4	3	2	8,5	8	1,0
A estratégia, pela forma e conteúdo, ajuda a motivar os alunos para a aprendizagem da Física.					1			6	1	3	8,4	8	1,4
Realça concepções errôneas históricas.	1					1	1	1	5	2	7,9	9	2,6

Outros aspectos referidos por três participantes foram:

“Na forma, deverá recorrer-se a simulações/applets para ilustrar cada um dos fenómenos. As ilustrações/exemplos são elucidativas e apelativas.”

“Abordagem conceitualmente difícil: requer uma capacidade de abstração elevada por parte do aluno. Requer uma boa conceitualização da relatividade galileana, nomeadamente os conceitos de referencial de inércia, transformações de Galileu e noção de invariância (a TRR é uma teoria que destaca os invariantes). São abordados anteriormente? Só assim os alunos conseguirão identificar a grande mudança de pensamento da relatividade galileana para a relatividade einsteiniana.”

“A maior dificuldade do ensino/aprendizagem da TRR está no facto de a maioria dos alunos terem baixos índices de literacia científica, mesmo no 12.º Ano, o que dificulta a compreensão deste tema.”

Analisando estes dados, pode-se observar que a concordância é elevada com os diferentes itens, variando entre os valores médios de 7,9 e 9,2; moda entre 8 e 10 e o desvio padrão entre 0,8 e 2,6. O item “realça as concepções errôneas históricas”, é o que tem uma média mais baixa (7,9), e uma maior dispersão de resultados (desvio padrão de 2,6), no entanto o valor mais frequente é o 9 (moda) o que revela uma divergência de opinião sobre este item.

A Tabela 4.7 mostra a avaliação realizada pelos professores à abordagem da experiência de Michelson-Morley.

Tabela 4.7 Avaliação da abordagem da experiência de Michelson-Morley (1 discorda totalmente, 10 concorda totalmente)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média	Moda	Desvio padrão
A sequência de atividades apresenta complexidade crescente, tendo em cada passo uma exploração e análise pormenorizada.							1	1	7	2	8,9	9	0,8
As múltiplas representações facilitam a construção de relações entre essas representações de forma a corrigir erros e a consolidar a aprendizagem do aluno.							2	2	4	3	8,7	9	1,1
As questões colocadas auxiliam o aluno no processo de reflexão crítica facilitando a sua aprendizagem sobre o tema.							2	2	4	3	8,7	9	1,1
A sequência das atividades é adequada.							2	5	2	2	8,4	8	1,0
A sequência reforça o desenvolvimento de competências específicas antes de competências gerais.					1		2	5	3		7,8	8	1,2
As atividades são suficientemente diversificadas e apelativas para interessar os alunos.					3	1		5	2		7,2	8	1,6
A exploração da experiência de Michelson-Morley é indispensável nesta temática.	1	1			1		1	3	1	3	7,1	10	3,1
Está adequada aos conhecimentos prévios dos alunos.		1		1	1	3	1	2	2		6,4	6	2,2

Outros aspectos referidos por dois participantes foram:

“Este assunto é muito avançado para alunos do secundário”.

“Esta experiência é concetualmente difícil, pouco apelativa para os alunos e não é necessária para a aprendizagem da TRR a este nível. Penso que será mais adequada numa disciplina inicial do ensino superior.”

Os resultados dos diferentes itens variam entre os valores médios de 6,4 e 8,9; a moda entre 6 e 10 e o desvio padrão entre 0,8 e 3,1. O item “Está adequada aos conhecimentos prévios dos alunos”, tem a média (7,9) e a moda mais baixas (6), e uma dispersão de resultados elevada relativamente aos outros itens (desvio padrão de 2,2). O item “A exploração da experiência de Michelson-Morley é indispensável nesta temática” tem a maior dispersão dos resultados (desvio padrão de 3,1), mostrando que existe alguns professores que discordam da exploração deste tema e que é ilustrado pelos dois comentários transcritos, no entanto a avaliação mais frequente é 10 (a moda).

A Tabela 4.8 apresenta a avaliação da abordagem da simultaneidade.

Tabela 4.8 Avaliação da abordagem da simultaneidade (1 discorda totalmente, 10 concorda totalmente)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média	Moda	Desvio padrão
A sequência de atividades apresenta complexidade crescente, tendo em cada passo uma exploração e análise pormenorizada.							1	1	7	2	8,9	9	0,8
As múltiplas representações facilitam a construção de relações entre essas representações de forma a corrigir erros e a consolidar a aprendizagem do aluno.							1	3	5	2	8,7	9	0,9
A sequência das atividades é adequada.								5	5	1	8,6	9	0,7
As questões colocadas auxiliam o aluno no processo de reflexão crítica facilitando a sua aprendizagem sobre o tema.							2	2	5	2	8,6	9	1,0
Os diagramas de espaço-tempo ajudam a corrigir erros e a consolidar a aprendizagem do aluno.						1	1	1	7	1	8,5	9	1,1
As atividades são suficientemente diversificadas e apelativas para interessar os alunos.						2		3	4	2	8,4	9	1,4
A sequência reforça o desenvolvimento de competências específicas antes de competências gerais.						1	1	4	4	1	8,3	8	1,1
Está adequada aos conhecimentos prévios dos alunos.	1				1	2	1	3	1	2	7,1	8	2,6

Relativamente a outros aspectos, dois participantes mencionaram que os diagramas de espaço-tempo são “difíceis para este nível”.

Os resultados dos diferentes itens variam entre os valores médios de 7,1 e 8,9; a moda entre 8 e 9 e o desvio padrão entre 0,7 e 2,6. O item “Está adequada aos conhecimentos prévios dos alunos”, tem a média (7,9) e a moda mais baixas (8), e uma dispersão de resultados elevada relativamente aos outros itens (desvio padrão de 2,6). No que se refere ao item “Os diagramas de espaço-tempo ajudam a corrigir erros e a consolidar a aprendizagem do aluno”, tem a média de 8,5, a moda 9, e o desvio padrão de 1,1 mostrando que a maioria dos professores considera importante a utilização dos diagramas de espaço-tempo nesta temática.

A Tabela 4.9 apresenta a avaliação da abordagem da dilatação do tempo.

Tabela 4.9 Avaliação da abordagem da dilatação do tempo (1 discorda totalmente, 10 concorda totalmente)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média	Moda	Desvio padrão
A sequência de atividades apresenta complexidade crescente, tendo em cada passo uma exploração e análise pormenorizada.							1	1	4	5	9,2	10	1,0
As múltiplas representações facilitam a construção de relações entre essas representações de forma a corrigir erros e a consolidar a aprendizagem do aluno.							1	2	5	3	8,9	9	0,9
A sequência das atividades é adequada.							1	2	6	2	8,8	9	0,9
As questões colocadas auxiliam o aluno no processo de reflexão crítica facilitando a sua aprendizagem sobre o tema.							1	2	6	2	8,8	9	0,9
A matematização da dilatação do tempo é apresentada de uma forma adequada para uma aprendizagem significativa.						1	1	2	4	3	8,6	9	1,3
A sequência reforça o desenvolvimento de competências específicas antes de competências gerais.							1	5	4	1	8,5	8	0,8
As atividades são suficientemente diversificadas e apelativas para interessar os alunos.						2	1	4	3	1	8,0	8	1,3
Está adequada aos conhecimentos prévios dos alunos.	1					1	3	2	4		7,3	9	2,3

Outros aspectos referidos por dois participantes foram:

“Tema de elevada complexidade para alunos de secundário.”

“Tudo o que envolva matematização envolve um 'trauma' associado. Os alunos tendem a fugir das representações matemáticas.”

Os resultados dos diferentes itens variam entre os valores médios de 7,3 e 9,2; a moda entre 8 e 10 e o desvio padrão entre 0,8 e 2,3. O item “Está adequada aos conhecimentos prévios dos alunos”, tem a média mais baixa (7,3) e a maior dispersão de resultados relativamente aos outros itens (desvio padrão de 2,3). No que se refere ao item “A matematização da dilatação do tempo é apresentada de uma forma adequada para uma aprendizagem significativa”, tem a média de 8,6, a moda 9, e o desvio padrão de 1,3 indicando que a maioria dos professores considera a matematização adequada ao tema.

A Tabela 4.10 apresenta a avaliação da abordagem da contração do espaço.

Tabela 4.10 Avaliação da abordagem da contração do espaço (1 discorda totalmente, 10 concorda totalmente)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média	Moda	Desvio padrão
As múltiplas representações facilitam a construção de relações entre essas representações de forma a corrigir erros e a consolidar a aprendizagem do aluno.								2	4	4	9,2	10	0,8
A sequência de atividades apresenta complexidade crescente, tendo em cada passo uma exploração e análise pormenorizada.								2	5	3	9,1	9	0,7
Os diagramas de espaço-tempo ajudam a corrigir erros e a consolidar a aprendizagem do aluno.						1		2	4	3	8,8	9	1,2
A sequência das atividades é adequada.							1	3	4	2	8,7	9	0,9
A matematização da contração do espaço é apresentada de uma forma adequada para uma aprendizagem significativa.						1		2	5	2	8,7	9	1,2
As questões colocadas auxiliam o aluno no processo de reflexão crítica facilitando a sua aprendizagem sobre o tema.							2	2	5	1	8,5	9	1,0
A sequência reforça o desenvolvimento de competências específicas antes de competências gerais.							1	5	2	2	8,5	8	1,0
As atividades são suficientemente diversificadas e apelativas para interessar os alunos.						2	1	1	4	2	8,3	9	1,5
Está adequada aos conhecimentos prévios dos alunos.	1				1	1	2			5	7,1	9	2,6

Outros aspectos referidos por quatro participantes foram:

“Temática de elevada complexidade para alunos do secundário.”

“Não gosto da expressão "O que vê...", melhor seria "O que mede...". Essa conceção é reforçada quando se diz que os objetos se contraem; o que se obtém é uma medida contraída, o objeto é o mesmo; os alunos pensam que os objetos encolhem... A TRR é uma teoria sobre a medida e é isso que deve ser enfatizado.”

“A utilização do Geogebra vai motivar os alunos, mas apenas aulas expositivas com tantas equações e diagramas, pode desmotivar. Todos os esquemas nos materiais estão extremamente perceptíveis e muito bem explicados.”

“Mais uma vez a questão prende-se com a Matemática. Há uma 'aversão' a matematizar as coisas.”

Os resultados dos diferentes itens variam entre os valores médios de 7,1 e 9,2; a moda entre 8 e 10 e o desvio padrão entre 0,7 e 2,6. O item “Está adequada aos conhecimentos prévios dos alunos”, tem a média mais baixa (7,1) e a maior dispersão de resultados relativamente aos outros itens (desvio padrão de 2,6).

Ensino e aprendizagem da TRR no ensino secundário

Os participantes deste estudo também foram inquiridos sobre importância da aprendizagem da TRR no ensino secundário, as principais dificuldades que encontraram e os materiais que utilizaram na preparação das suas aulas. Com base nas suas respostas construímos as Tabelas 4.11, 4.12, e 4.13.

A Tabela 4.11 apresenta a avaliação da importância da aprendizagem da TRR no ensino secundário.

Tabela 4.11 Avaliação da importância da aprendizagem da TRR no ensino secundário (1 discorda totalmente, 10 concorda totalmente)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média	Moda	Desvio padrão
Proporciona uma visão mais correta sobre o papel da comunidade científica na construção do conhecimento científico.				1				1	5	4	8,8	9	1,7
Ajuda os alunos a se questionarem acerca do modo de pensar o Mundo.				1				1	6	3	8,7	9	1,7
Contribui para a literacia científica.					1		1	1	5	3	8,6	9	1,5
Ajuda os alunos numa progressão mais bem sucedida pelo ensino universitário.					2		1	3	2	3	8,1	8	1,8
Enquadra-se numa perspetiva Ciência-Tecnologia-Sociedade-Ambiente.				1	1		2	3	3	1	7,6	9	1,8
A TRR como tema fundamental da Física Moderna deveria estar no programa de 12.º ano de Física.	1			1			2	2	3	2	7,5	9	2,7
Motiva os alunos para a aprendizagem da Física.		1			2		3	2	1	2	7,1	7	2,4

Outros aspectos referidos por dois participantes foram:

“Apenas deve ser uma oferta de escola para grupos de alunos que tenham revelado no passado um nível de competências de abstração e matematização elevados. Não deve ser uma proposta curricular na disciplina de Física.”

“Nem todos os alunos têm facilidade em mudar a sua forma de ver o mundo e, por isso, nem todos reagem bem ao novo paradigma. A sua inclusão no 12º ano é importante, mas, no atual contexto (redução horária), penso que há outros temas mais úteis para os alunos se tivermos em conta o futuro percurso escolar no ensino superior e os temas que lá são tratados.”

Os resultados dos diferentes itens variam entre os valores médios de 7,1 e 8,8; a moda entre 7 e 9 e o desvio padrão entre 1,5 e 2,7. O item “Motiva os alunos para a aprendizagem da Física”, tem a média mais baixa (7,1) a moda (7) e uma dispersão elevada de resultados relativamente aos outros itens (desvio padrão de 2,4). O item “A TRR como tema fundamental da Física Moderna deveria estar no programa de 12.º ano de Física”, tem a maior dispersão de resultados (2,7), mas a média é de 7,5 e a moda de 9 mostrando que a maioria dos professores concorda com a inserção da TRR no 12.º ano.

Relativamente às dificuldades na leção da TRR colocamos uma questão de escolha múltipla, cujos resultados estão compilados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 Dificuldades na leção da TRR

	N	%
Os conceitos relativistas são conceptualmente difíceis.	5	45,5
Os alunos não estão preparados para interpretar os conceitos relativistas.	5	45,5
Durante a formação académica não foi abordado este tema.	4	36,4
Existe pouca formação disponível nesta temática.	4	36,4
Existem poucos materiais disponíveis para a leção.	2	18,2
Outras dificuldades	2	18,2

Nesta tabela, observamos que em primeiro lugar constam os itens “Os conceitos relativistas são conceptualmente difíceis” e “Os alunos não estão preparados para interpretar os conceitos relativistas”, com 45,5 %. A seguir os itens “Durante a formação académica não foi abordado este tema” e “Existe pouca formação disponível nesta temática”, com 36,4 %. E, em último, o item “Existem poucos materiais disponíveis para a leção”, com 18,2 %.

Quanto a outras dificuldades apontam para:

“A matematização envolvida exige, também, um domínio elevado no âmbito da Matemática o que, conjugado com o nível de abstração elevado da temática em si, torna ainda mais difícil obter aprendizagens significativas com alunos ditos normais.”

“Iliteracia numérica e científica dos alunos prejudica a compreensão plena do alcance da teoria relativista; desconhecimento dos conceitos básicos da teoria relativista, ainda que já tenham ouvido falar dela.

A Tabela 4.13, apresenta os materiais utilizados para planificar as aulas e, ou, como recurso nas aulas.

Tabela 4.13 Materiais utilizados para planificar as aulas e, ou, como recurso nas aulas

	Materiais utilizados	N	%
Manual	Manual adotado	9	81,8
	Outros manuais	3	27,3
Livros de divulgação científica	Nova física divertida, Carlos Fiolhais	8	72,7
	Cosmos, Carl Sagan	7	63,6
	O tempo e o espaço do tio Albert, Russell Stannard	4	36,4
	A evolução da física, Albert Einstein e Leopold Infeld	4	36,4
	O novo mundo do sr. Tompkins, George Gamow e Russell Stannard	3	27,3
	O annus mirabilis de Einstein: cinco artigos que revolucionaram a física, John Stachel	2	18,2
	Outros livros de divulgação	0	0,0
Outros livros de Física	Física, Marcelo Alonso e Edward Finn	7	63,6
	Fundamentos de física: ótica e física moderna, David Halliday, Robert Resnick e Jearl Walker	6	54,5
	Introdução à física, Jorge Dias de Deus, Mário Pimenta, Ana Noronha, Teresa Peña e Pedro Brogueira	5	45,5
	Modern physics, Paul Tipler e Ralph Liewellyn	5	45,5
	Motion mountain, the adventure of physics, Christoph Schiller (http://www.motionmountain.net)	1	9,1
	The modern revolutions in physics, Benjamin Crowell (http://ufdcimages.uflib.ufl.edu/AA/00/01/17/39/00001/ModernPhysics.pdf)	0	0,0
	Outros livros de Física	3	27,3
Filmes e animações	Cosmos part 8: travels in space and time, Carl Sagan (http://www.youtube.com/watch?v=N7gGbTBJLgw)	4	36,4
	Flash animations for physics, Universidade de Toronto (http://faraday.physics.utoronto.ca/GeneralInterest/Harrison/Flash/#relativity)	4	36,4
	Physics flashlets, Michael Fowler (http://galileoandeinstein.physics.virginia.edu/more_stuff/flashlets/mmexpt6.htm ; http://galileoandeinstein.physics.virginia.edu/more_stuff/flashlets/lightclock.swf)	3	27,3
	Simultaneidade (e.g., http://www.youtube.com/watch?v=wteixyqtoM)	1	9,1
	Everyday Einstein: GPS & Relativity – Perimeter Institute for Theoretical Physics (https://perimeterinstitute.ca/store/perimeter-inspirations/everyday-einstein-gps-relativity)	0	0,0
	Outros filmes e animações	2	18,2
Artigos científicos	On the relative motion of the earth and the luminiferous ether, Albert Michelson e Edward Morley	4	36,4
	Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento, Albert Einstein	3	27,3
	Outros artigos científicos	2	18,2
Páginas da Internet	Center for history of physics, A. Einstein (http://www.aip.org/history/einstein)	3	27,3
	Outras	2	18,2
Outros recursos	Outros recursos	2	18,2

Pelo exposto na tabela, reconhecemos que a maioria dos professores (81,8%), ou a totalidade dos professores, considerando que existem participantes que nunca lecionaram o tema TRR no 12.º ano, utiliza o manual adotado. Apenas 27,3% utilizam outros manuais.

Também utilizam livros de divulgação sendo o mais usado “Nova física divertida”, do autor Carlos Fiolhais (72,7%).

O livro de Física maioritariamente utilizado é “Física” dos autores Marcelo Alonso e Edward Finn (63,6%), seguido do livro “Fundamentos de física: ótica e física moderna” dos autores David Halliday, Robert Resnick e Jearl Walker. Apenas um professor utiliza um dos dois livros disponíveis gratuitamente na internet.

4.1.5 Algumas conclusões do questionário

Da análise dos onze questionários realizados a professores portugueses ligados ao ensino e aprendizagem da física podemos concluir que a avaliação da proposta didática apresentada é francamente positiva.

Em termos de avaliação global, concordaram que a proposta:

- Contemplou “os conceitos fundamentais da TRR”;
- “Refere os cientistas que se distinguiram na construção dos conhecimentos tratados”;
- Apresenta uma “sequência das atividades [...] adequada”;
- “Apresenta a evolução histórica dos conceitos mais importantes”;
- “Proporciona uma perspetiva da ciência como um processo social em construção”;
- “Permite a reflexão sobre a importância da história da ciência na sua aprendizagem”;
- “Possibilita a discussão de mudanças do conhecimento científico”;
- “Contribui para uma visão crítica da ciência e do seu desenvolvimento”;
- “A estratégia [...] ajuda a motivar os alunos para a aprendizagem da Física”;
- “Realça concepções erróneas históricas”.

Na avaliação das abordagens dos diferentes tópicos, os itens com médias mais elevadas são

- A “sequência de atividades apresenta complexidade crescente, tendo em cada passo uma exploração e análise pormenorizada”;
- As “múltiplas representações facilitam a construção de relações entre essas representações de forma a corrigir erros e a consolidar a aprendizagem do aluno”,

seguidos dos itens

- “As questões colocadas auxiliam o aluno no processo de reflexão crítica facilitando a sua aprendizagem sobre o tema”;
- “A sequência das atividades é adequada”;
- “A sequência reforça o desenvolvimento de competências específicas antes de competências gerais”;
- “As atividades são suficientemente diversificadas e apelativas para interessar os alunos”.
- “Está adequada aos conhecimentos prévios dos alunos”, foi avaliado com a menor média, no entanto é o item com maior dispersão de resultados, refletindo a divergência de opiniões;
- “A exploração da experiência de Michelson-Morley é indispensável nesta temática”, tem a maior dispersão dos resultados (desvio padrão de 3,1), mostrando que existe alguns professores que discordam da exploração deste tema, no entanto a avaliação mais frequente é 10 (a moda);
- “Os diagramas de espaço-tempo ajudam a corrigir erros e a consolidar a aprendizagem do aluno”, nos tópicos simultaneidade e contração do espaço, têm as médias de 8,5 e 8,8, a moda 9, e os desvios padrão de 1,1 e 1,2, respetivamente, mostrando que a maioria dos professores considera importante a utilização dos diagramas de espaço-tempo nesta temática.

Os participantes também reconhecem que a “matematização da dilatação do tempo [...]” e da “contração do espaço [...]” são apresentadas de “[...] forma adequada para uma aprendizagem significativa” (médias de 8,5 e 8,7, a moda 9, e desvios padrão de 1,3 e 1,2, respetivamente).

Relativamente à avaliação da importância da aprendizagem da TRR no ensino secundário, constatamos uma maior dispersão de opiniões; no entanto, maioritariamente os professores avaliam este tema positivamente:

- “Proporciona uma visão mais correta sobre o papel da comunidade científica na construção do conhecimento científico”;
- “Ajuda os alunos a se questionarem acerca do modo de pensar o Mundo”;
- “Contribui para a literacia científica”;
- “Ajuda os alunos numa progressão mais bem sucedida pelo ensino universitário”;
- “Enquadra-se numa perspetiva Ciência-Tecnologia-Sociedade-Ambiente”;
- “A TRR como tema fundamental da Física Moderna deveria estar no programa de 12.º ano de Física”.

O item “motiva os alunos para a aprendizagem da Física” é o que tem uma menor média.

A maior dificuldade de lecionação apontada prende-se às dificuldades conceptuais dos conceitos relativistas, seguida da pouca formação dos professores na temática.

Menos de metade dos inquiridos da nossa amostra, utiliza filmes e animações, artigos científicos, páginas da internet e outros recursos. Verificamos assim, que o ensino ainda está muito virado para a utilização de livros e pouca utilização das novas tecnologias.

4.2 Estudo com alunos

4.2.1 Metodologia e participantes

O teste aplicado aos professores também foi aplicado a oito alunos do 12.º ano do Ensino Secundário, que faziam parte do “Projeto Física +” da escola onde leciono. Este projeto foi criado e desenvolvido por mim, em parceria com a FCT/UNL, para dar resposta a um grupo de alunos interessados em aprofundar conhecimentos de física. Tendo em conta que a Física Moderna, nomeadamente a TRR, constava no plano do projeto, os alunos aceitaram em participar neste estudo. No entanto, só foi possível aplicá-lo no final do ano letivo, apenas em quatro sessões, no total de cinco horas, com a seguinte distribuição:

1.ª sessão (1 hora)

Excerto de um pequeno filme sobre a teoria da relatividade restrita para introduzir a problemática ligada à TRR; apresentação/discussão da experiência de Michelson-Morley, utilizando os materiais construídos em ppt. Estiveram presentes sete alunos.

2.ª sessão (1 hora)

Apresentação/discussão simultaneidade 1, 2 e 3, utilizando os materiais construídos em ppt sem explorar as questões quantitativas. Estiveram presentes os mesmos sete alunos.

3.ª sessão (1 hora)

Apresentação/discussão da dilatação do tempo e da contração dos espaços utilizando os materiais construídos em ppt, sem os diagramas de espaço-tempo, pois denotamos algumas dificuldades com a interpretação dos gráficos. Estiveram presentes oito alunos.

4.ª sessão (2 horas)

Apresentação/discussão diagramas de espaço-tempo, explorando os exemplos Geogebra conjuntamente com os materiais construídos em ppt. Na segunda hora foram aplicados o teste, seguido do inquérito por questionário, respondido on-line (Anexo III). Estiveram presentes oito alunos.

Durante o teste, os alunos tiveram acesso aos materiais apresentados nas diversas sessões e ao teste em ppt, com dois filmes que simulam as duas situações-problema e, para cada questão, vários diagramas de espaço-tempo de escolha múltipla (Anexo IV).

4.2.2 Resultados e análise dos resultados do teste

O procedimento de análise das respostas dos testes dos alunos foi igual ao dos professores. Assim, analisamos as respostas dos oito testes em termos qualitativos e quantitativos. Em termos qualitativos tentamos separar os raciocínios baseados na TRR, na relatividade galileana (RG) e no pensamento espontâneo (PE). Em termos quantitativos, a Tabela 4.14 mostra os resultados das respostas corretas (com a justificação completa, incompleta, sem justificação e com justificação errada) e as respostas erradas de acordo com a RG ou PE, nos pré-testes e nos pós-testes. Nesta tabela não distinguimos as justificações incorretas de acordo com RG ou PE e também não diferenciamos as respostas que misturam a RG com o PE, classificando-as apenas como PE. Tabela mais completa em anexo (Anexo VI)

Tabela 4.14 Resultados do teste sobre as concepções da TRR (alunos)

Questões	Teoria da Relatividade Restrita		Relatividade Galileana		Pensamento Espontâneo	
	Teste	Diagrama	Teste		Teste	
1	8 a)	5				
	7 a) e 1 b)					
	6 a); 1 b) e 1 d)					
2		2	3		5	
3		2	3		5	
4	5 a) e 1 b)	5			2	
5	2 a); 1 b) e 2 d)	6			2	
6	1 a); 2 b) e 3 d)	7			2	
7	3 a) e 2 b)	6			2	

a) Justificação completa; b) Justificação incompleta; c) Sem justificação; d) Justificação errada.

Primeira situação problema

Duas naves espaciais, NA e NB, viajam com a velocidade $v = c/2$, em sentidos opostos ao longo da mesma linha reta. “c” representa a velocidade da luz no vácuo. Quando passam pela antena A1, esta emite um

sinal luminoso L_B no sentido em que viaja a nave N_B e, simultaneamente, outro sinal luminoso L_A no sentido em que viaja a nave N_A .

Questão 1- Comparação das distâncias percorridas entre A_1 e N_A , A_1 e N_B , A_1 e L_A

A maioria dos alunos respondeu corretamente à questão e justificam-na corretamente de forma qualitativa ou utilizando expressões. Existe uma resposta incompleta pois não indica a distância entre as naves e a antena A_1 e outra que resposta errada porque confunde a distância de N_B a A_1 , com uma distância entre naves que apesar de estar correta não responde à questão. Em relação aos diagramas de espaço-tempo, cinco alunos escolheram a opção correta.

Questão 2 – Distância percorrida pelos sinais L_A e L_B em relação N_B

Todas as respostas estão em desacordo com a relatividade einsteiniana, considerando implicitamente o referencial terrestre como o referencial privilegiado e a distância a L_B menor que a distância a L_A . Como exemplo mostram-se duas respostas tipo:

“No meu referencial a distância L_B de mim é menor do que a distância L_A de mim ... eu afasto-me cada vez mais da antena A_1 . Como a direção do sinal L_A é oposta ao sentido do meu movimento eu perceciono o sinal L_B , que tem a direção do meu movimento, como estando mais perto de mim ...”.

“Distâncias diferentes. A distância do sinal L_B à nave N_B distância $d/2$ e a distância de N_B ao sinal L_A é $3/2 d$ ”.

A primeira resposta reflete as justificações predominantes do pensamento espontâneo, onde o referencial terrestre é absoluto e onde se situa o observador privilegiado. A segunda resposta não revela um raciocínio claro da relatividade galileana, pois continua a considerar um referencial privilegiado (terrestre), embora suponha um referencial absoluto (Terra) onde a luz tem a mesma velocidade em todas as direções.

Apenas dois alunos escolhem a opção correta dos diagramas de espaço-tempo.

Questão 3 – Distância percorrida pelos sinais L_A e L_B em relação N_A

As respostas a esta questão estão de acordo com as da questão anterior.

Segunda situação problema

Uma nave possui uma antena A na extremidade traseira e um espelho E na sua extremidade dianteira. A distância entre a antena A e o espelho E é d . A nave viaja a uma velocidade $v = c/2$ e passa por cima de uma estação terrestre, na vertical. Nesse instante, a antena A emite um sinal luminoso. O sinal atinge o espelho E, é refletido e regressa à antena A.

Questão 4 – Comparação dos tempos decorridos entre A e E e entre E e A em relação à nave

Nesta questão existe uma resposta incorreta que considera o sinal luminoso a demorar mais tempo a ir de A a E:

“Alguém que viaje na nave, o sinal luminoso demora mais tempo a ir da antena A ao espelho E do que a regressar do espelho E à antena A, porque a nave desloca-se no sentido de $A \rightarrow E$ e, por isso, este movimento dura um tempo maior que no sentido contrário.”

Como a antena não se move no referencial em questão estamos perante um raciocínio espontâneo que assenta num referencial absoluto.

Também existe uma resposta que considera o contrário, mas não justifica.

Em relação aos diagramas de espaço-tempo, cinco alunos escolheram a opção correta

Questão 5 – Comparação dos tempos decorridos entre A e E e entre E e A em relação à estação terrestre

Existem duas respostas corretas, mas com a seguinte justificação tipo:

“Demora mais tempo a ir de A a E, o observador desta vez está na Terra (mais longe) e de E a A a nave viaja no sentido contrário ao do sinal emitido, dando a sensação que o tempo é menor de E a A do que de A a E”.

As respostas incorretas consideram que o sinal luminoso demora mais tempo a ir de E a A e a justificação que predomina é:

“Para alguém que esteja na estação terrestre, o sinal luminoso demora menos tempo a ir da antena A ao espelho E do que a regressar do espelho E à antena A, porque como vê a nave a afastar-se cada vez mais no sentido $A \rightarrow E$, o sinal luminoso demora menos tempo a percorrer a mesma distância neste sentido”.

Na primeira justificação como sendo um movimento aparente, percecionado pelos sentidos, típico dos raciocínios baseados em pensamentos espontâneos e não de efeitos relativistas. Ambas respostas mostram que existe dificuldade em distinguir a ocorrência de um acontecimento e a perceção do acontecimento pelo observador num referencial.

Existe um participante que não respondeu.

Em relação aos diagramas de espaço-tempo, seis alunos escolheram a opção correta

Questão 6 – Comparação dos tempos decorridos entre A e E em relação à estação terrestre e à nave

Mostramos exemplos de algumas respostas e das suas justificações:

“Nenhum, o sinal luminoso demora o mesmo tempo a percorrer a distância da antena A ao espelho E para alguém da nave ou para alguém da estação terrestre”.

A mesma distância percorrida nos dois referenciais, o que é uma característica da cinemática espontânea.

“Na estação terrestre, dado que o observador na estação se encontra a uma maior distância do acontecimento, e o observador vê também a nave e o sinal a viajarem no mesmo sentido”.

“O sinal luminoso demora mais tempo a percorrer a distância da antena A ao espelho E para quem está na nave, pelo que foi explicado nas questões 4 e 5”.

Estas respostas estão de acordo com as respostas às questões anteriores. Apesar da primeira resposta estar correta, ambas justificações são coerentes em relação ao papel do observador, revelando um pensamento espontâneo.

Em relação aos diagramas de espaço-tempo, sete alunos escolheram a opção correta.

Questão 7 – Comparação dos tempos decorridos entre E e A em relação à estação terrestre e à nave

Mostra-se o exemplo tipo da resposta incorreta a esta questão:

“O sinal luminoso demora mais tempo a percorrer a distância do espelho E à antena A para quem está na estação terrestre”

Está de acordo com as respostas às questões anteriores em relação ao papel do observador, revelando um pensamento espontâneo.

Em relação aos diagramas de espaço-tempo, seis alunos escolheram a opção correta.

4.2.3 Algumas conclusões do teste

A Tabela 4.15 mostra um quadro que reúne os resultados das respostas corretas (com a justificação completa, incompleta, sem justificação e com justificação errada) e as respostas erradas de acordo com a RG ou PE, nos nove pré-testes e nos pós-testes dos professores e dos oito testes dos alunos (Tabelas 4.13 e 4.14).

Tabela 4.15 Quadro síntese dos resultados dos testes sobre as concepções da TRR dos professores (9) e dos alunos (8)

Questões	Teoria da Relatividade Restrita				Relatividade Galileana			Pensamento Espontâneo		
	Professores		Alunos		Professores		Alunos	Professores		Alunos
	Pré	Pós	Pós	Diagrama	Pré	Pós	Pós	Pré	Pós	Pós
1	8 a) e 1 b)	8 a) e 1 b)	8 a)	5						
	7 a) e 1 b)	7 a) e 1 b)	7 a) e 1 b)					1	1	
	6 a) e 1 b)	5 a) e 1 b)	6 a); 1 b) e 1 d)					2	3	
2	1 a) e 1 d)	1 d)		2	6	7	2	1	1	5
3	1 a) e 1 d)	1 d)		2	6	7	2	1	1	5
4	6 a)	7 a)	5 a) e 1 b)	5				3	2	2
5	4 a) e 1 c)	4 a) e 1 c)	2 a); 1 b) e 2 d)	6	1	1		3	3	2
6	2 a); 1 c) e 2 d)	2 a) e 4 d)	1 a); 2 b) e 3 d)	7				3	2	2
7	2 a)	2 a); 1 b) e 1 c)	3 a) e 2 b)	6				5	5	2

a) Justificação completa; b) Justificação incompleta; c) Sem justificação; d) Justificação errada.

Da análise dos resultados dos testes realizados aos alunos do 12.º ano do ensino secundário, identificamos características que estão presentes na literatura e também no estudo realizado com professores. No entanto, existem algumas diferenças entre as concepções alternativas dos professores e dos alunos. As dos professores aparecem, geralmente, de um modo mais reflexivo, são manipuladas de um modo mais consciente e subtil, de acordo com o identificado por Valadares (1995).

4.2.4 Resultados e análise dos resultados do questionário

Os resultados do inquérito por questionário aplicado aos alunos estão expostos Tabela 4.16:

Tabela 4.16 Resultados do questionário aos alunos sobre a TRR

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média	Moda	Desvio padrão
O tema proporciona uma visão do papel da comunidade científica na construção do conhecimento científico								3	3	2	8,9	9	0,8
A Teoria da Relatividade Restrita é um tema que deveria constar no programa da disciplina opcional de Física do 12.º ano					1			1	3	3	8,8	9	1,7
A Teoria da Relatividade Restrita é um tema interessante							3		2	3	8,6	10	1,4
A Teoria da Relatividade Restrita é um tema que motiva os alunos para estudarem Física		1					1	2	2	2	7,9	9	2,6
Os conceitos relativistas são conceptualmente difíceis		1			1				4	2	7,9	9	2,9
A matemática envolvida é de fácil aplicação					1	1	1	3		2	7,8	8	1,8
Evolução histórica do tema é interessante	1							5	1	1	7,5	8	2,7
A sequência de atividades permitiu compreender a experiência de Michelson-Morley						3	2	1	2		7,3	6	1,3
A sequência de atividades permitiu compreender os diagramas de espaço-tempo	1				1	1	1	2	2		6,6	8	2,7
A sequência de atividades permitiu compreender a dilatação do tempo		2			1		1	1	2	1	6,5	9	3,2
A sequência de atividades permitiu compreender a contração do espaço	1	1			1		2	1	1	1	6,1	7	3,2
A sequência de atividades permitiu compreender as expressões matemáticas da dilatação do tempo e da contração do espaço		1		1	2	1	1	1	1		5,8	5	2,3

Analisando os dados desta tabela, podemos observar os valores médios variam entre 8,9 e 5,8; moda entre 10 e 5 e o desvio padrão entre 3,2 e 0,8. Os itens relacionados com o “tema ser interessante” são os que têm os valores mais elevados de média e moda, e os mais baixos de dispersão de resultados. O item “A sequência de atividades permitiu compreender as expressões matemáticas da dilatação do tempo e da contração do espaço” é o que tem uma média mais baixa (5,8), com alguma dispersão de resultados de 2,3 (desvio padrão de 2,3) e o valor mais frequente é o 5 (moda de 5).

4.2.5 Algumas conclusões

Dos oito questionários realizados aos alunos do 12.º ano e tendo em conta os itens com maior média (maior que 8,5), podemos concluir que estes consideram a TRR como um tema que:

- “Proporciona uma visão do papel da comunidade científica na construção do conhecimento científico”;
- “Deveria constar no programa da disciplina opcional de Física do 12.º ano”;

- “A Teoria da Relatividade Restrita é um tema interessante”.

Os alunos também concordam, por ordem decrescente da média, que:

- “A Teoria da Relatividade Restrita é um tema que motiva os alunos para estudarem Física”;
- “Os conceitos relativistas são conceptualmente difíceis”;
- “A matemática envolvida é de fácil aplicação”;
- A “evolução histórica do tema é interessante”;
- “A sequência de atividades permitiu compreender a experiência de Michelson-Morley”;
- “A sequência de atividades permitiu compreender os diagramas de espaço-tempo”;
- “A sequência de atividades permitiu compreender a dilatação do tempo”;
- “A sequência de atividades permitiu compreender a contração do espaço”.

O item “a sequência de atividades permitiu compreender as expressões matemáticas da dilatação do tempo e da contração do espaço” e o que tem uma avaliação média menor (5,8); no entanto, consideram que a matemática envolvida é de fácil aplicação (média 7,8; moda 8; desvio padrão 1,8) — provavelmente esta conclusão deveu-se ao pouco tempo para a exploração dos materiais.

5 Considerações finais e algumas reflexões

5.1 Principais conclusões do estudo

Esta dissertação “Sobre o Ensino da Teoria da Relatividade Restrita” pretende contribuir para um melhor ensino-aprendizagem da física em Portugal, através da elaboração de uma proposta didática do ensino da Teoria da Relatividade Restrita fundamentada na Psicologia da Aprendizagem, na História das Ideias e na investigação em Ensino da Física. Para atingir os nossos objetivos colocamos a questão central que norteou o nosso trabalho:

- Que estrutura curricular é adequada para favorecer a aprendizagem significativa da TRR?

Para a operacionalização desta questão de investigação, consideramos mais quatro subquestões:

- Quais são as concepções dos professores e dos alunos, sobre os aspectos essenciais da TRR?
- Quais são as principais dificuldades dos professores e dos alunos?
- Quais são os materiais que os professores utilizam na preparação das aulas?
- Qual é a importância da aprendizagem da TRR no ensino secundário?

Para responder à(s) questão(ões) de investigação construímos dois instrumentos investigativos.

O primeiro instrumento consistiu num teste envolvendo duas situações-problema com sete questões que foi aplicado a professores e alunos. Para responder à questão:

Quais são as concepções dos professores e dos alunos, sobre os aspectos essenciais da TRR?

Depois da análise dos resultados, as conclusões que chegamos foram:

- As diferenças entre os pré-testes e os pós-testes dos professores são pequenas revelando que a sessão foi insuficiente para “relembrar” os conceitos da TRR, provavelmente provocando um conflito cognitivo entre a incompatibilidade das suas crenças e os conceitos relativistas einsteinianos;
- A existência do aumento do número de respostas incompatíveis com os conceitos relativísticos quando se muda de um referencial terrestre para um referencial em movimento;
- Nas respostas corretas, os raciocínios são por vezes incompletos ou misturados com noções do pensamento espontâneo;
- A existência de dificuldades na mudança de referencial e no papel do observador no referencial;
- A presença de concepções do tempo, espaço e movimentos absolutos;

- A utilização do carácter infinito da velocidade da luz;
- A existência de algumas diferenças entre as concepções alternativas dos professores e dos alunos. As dos professores aparecem, geralmente, de um modo mais reflexivo, são manipuladas de um modo mais consciente e subtil.

Os resultados sugerem a construção de um quadro conceptual em que coexistem as ideias espontâneas e os raciocínios relativistas, einsteinianos e galileanos. As conclusões do estudo estão de acordo com as identificadas na literatura como por exemplo, as referidas por Villani e Pacca (1987.1990), Valadares (1995) e por Scherr, Shaffer e Vokos (2002).

O segundo instrumento constou de dois inquéritos por questionário: um aplicado a professores e o outro aplicado a alunos. Com esse questionário, pretendia-se informação para responder às restantes questões:

Quais são as principais dificuldades dos professores e dos alunos?

Os professores apontaram como maior dificuldade de lecionação “as dificuldades conceptuais dos conceitos relativistas”, seguida da “pouca formação dos professores na temática”.

Os alunos apontaram como maior dificuldade a sequência de atividades que permitiu chegar às “expressões matemáticas da dilatação do tempo e da contração do espaço”, no entanto consideram que a “matemática envolvida é de fácil aplicação”.

Quais são os materiais que os professores utilizam na preparação das aulas?

Os materiais que os participantes do nosso estudo utilizam são:

- O manual adotado, pela maioria dos professores, ou a totalidade, considerando que existem alguns que nunca lecionaram o tema TRR no 12.º ano e poucos usam outros manuais (27,3%);
- Livros de divulgação; o mais usado é “Nova física divertida”, de Carlos Fiolhais;
- Livros de física geral; o mais utilizado é “Física” dos autores Marcelo Alonso e Edward Finn (63,6%), seguido do livro “Fundamentos de física: ótica e física moderna” de David Halliday, Robert Resnick e Jearl Walker;
- Livros de física disponíveis gratuitamente na internet, filmes e animações, artigos científicos, páginas da internet e outros recursos, são utilizados por menos de metade dos inquiridos.

Verificamos assim que o ensino, nomeadamente o ensino da TRR, ainda está muito virado para a utilização de livros e relativamente pouca utilização de novos media e novas tecnologias. Confirma-se assim o que *suspeitávamos*, relativamente à nossa amostra de professores: estes seguem o manual escolar, como verificado em outros países.

Qual é a importância da aprendizagem da TRR no ensino secundário?

Na avaliação da importância da aprendizagem da TRR no ensino secundário, constatamos uma maior dispersão de opiniões, no entanto, maioritariamente os professores avaliam positivamente a relevância deste tema. Os alunos também consideram o tema interessante e que deveria continuar a constar no currículo do 12.º ano.

Que estrutura curricular é adequada para favorecer a aprendizagem significativa da TRR?

Em termos de avaliação da proposta didática elaborada, os participantes concordaram que esta contempla:

- “Os conceitos fundamentais da TRR”;
- Os “[...] cientistas que se distinguiram na construção dos conhecimentos tratados”;
- A “[...] evolução histórica dos conceitos mais importantes”;
- A “[...] perspetiva da ciência como um processo social em construção”;
- A “[...] reflexão sobre a importância da história da ciência na sua aprendizagem”;
- A “[...] discussão de mudanças do conhecimento científico”;
- Uma “[...] visão crítica da ciência e do seu desenvolvimento”;
- Uma “[...] estratégia, pela forma e conteúdo” que “ajuda a motivar os alunos para a aprendizagem da física”;
- As “[...] conceções erróneas históricas”;
- Uma adequada “[...] sequência das atividades [...]” que “[...] reforça o desenvolvimento de competências específicas antes de competências gerais”;
- Sequências de atividades que apresentam “[...] complexidade crescente, tendo em cada passo uma exploração e análise pormenorizada”;
- “As atividades [...] suficientemente diversificadas e apelativas para interessar os alunos”;
- Múltiplas representações que “[...] facilitam a construção de relações entre essas representações de forma a corrigir erros e a consolidar a aprendizagem do aluno”;
- Questões para auxiliarem “[...] o aluno no processo de reflexão crítica facilitando a sua aprendizagem sobre o tema”;
- “Os diagramas de espaço-tempo ajudam a corrigir erros e a consolidar a aprendizagem do aluno”;
- A “matematização da dilatação do tempo [...]” e da “[...] contração do espaço” apresentadas de “[...] forma adequada para uma aprendizagem significativa”;
- Os “[...] conhecimentos prévios dos alunos”, apesar deste item ter sido avaliado com a menor média, é o item com maior dispersão de resultados, refletindo a divergência de opiniões;

- “A exploração da experiência de Michelson-Morley é indispensável nesta temática”, item com a maior dispersão dos resultados (desvio padrão de 3,1), mostrando que existe alguns professores que discordam da exploração deste tema, no entanto a avaliação mais frequente é 10 (a moda).

Esta avaliação permite-nos concluir que a proposta didática elaborada sobre a TRR, está fundamentada na Psicologia da Aprendizagem, na História das Ideias e na investigação em Ensino da Física, favorecendo a aprendizagem significativa.

Esperamos que este trabalho contribua para uma melhor compreensão dos processos de ensino e aprendizagem da TRR, para obter uma metodologia validada com materiais para os professores, fundamentados nessa metodologia, e apoiar os autores de currículos na integração curricular de tópicos complexos e avançados ao nível não superior.

5.2 Limitações do estudo

Encontramos várias limitações a este estudo, entre as quais destacamos o tempo de aplicação da proposta didática tanto a professores como a alunos. Como já referimos, a consolidação não é imediata, demora tempo, e por isso a resolução das situações-problema, clarificações, discriminações, diferenciações, integrações devem ser tidas em conta antes de inserir novos conhecimentos. Por isso, não foi possível obter mais evidências da aprendizagem significativa (captação de significados, compreensão, capacidade de explicar, de aplicar o conhecimento para resolver situações-problema) por aplicação da proposta.

Com os professores, o ideal teria sido a realização da formação acreditada sobre a Teoria da Relatividade Restrita, como tínhamos inicialmente planeado, mas tendo em conta a fraca adesão a formações com temas específicos optámos apenas por uma sessão noutra atividade de formação com professores, onde aplicamos apenas o pré-teste e o pós-teste. Com os alunos, a proposta deveria ser aplicada como conteúdo a ser abordado na disciplina de opção de Física do 12.º ano de escolaridade.

Relativamente ao inquérito por questionário aplicado a professores, se a amostra fosse maior, como pretendíamos, as conclusões poderiam ser provavelmente generalizáveis. Mas como a amostra é pequena, as conclusões restringem-se apenas aquele grupo de professores.

No entanto, como trabalhamos com várias amostras e simultaneamente com professores e alunos, permitiu-nos cruzar os dados recolhidos avaliando a estabilidade dos resultados, considerando assim, que conseguimos responder à nossa questão de investigação.

5.3 Sugestões para futuras investigações

Este tema não está de modo algum esgotado. E não tenhamos dúvidas que ele suscita muito interesse aos alunos.

Esperamos com este trabalho ter pelo menos sensibilizado para a necessidade de mudança nos currículos. Gostaríamos que, pelo menos, possa servir como ponto de partida para futuras investigações dentro desta problemática do ensino da física. Existem conceitos associados à Relatividade Restrita que poderiam ser introduzidos no terceiro ciclo, pois estamos a falar dos conceitos tempo, espaço e movimento. Por exemplo, quando lecionamos a física do 7.º ano unificado, o passar um pequeno filme sobre o universo para discutir o carácter finito da velocidade da luz, para discutir que o que observamos no espaço já aconteceu, já é passado. Talvez os professores fiquem surpreendidos com o debate que estas situações podem gerar. Acima de tudo devemos suscitar curiosidade sobre o que nos rodeia, sobre ciência. Os alunos devem ser educados em Ciência, através da Ciência e sobre a Ciência “learning science, learning about science and doing science” (Hodson, 2003, p. 118).

Referências

- Abimbola, I. O. (1988). The problem of terminology in the study of student conceptions in science. *Science Education*, 72(2), 175–184.
- American Association for the Advancement of Science. (1993). *Benchmarks online: The nature of science*. Retrieved January 9, 2016, from <http://www.project2061.org/publications/bsl/online/index.php?chapter=1&txtRef=&txtURIId=%2Fpublications%2Fbsl%2Fonline%2Fch1%2Fch1.htm#B3>
- Arriasecq, I. (2008). *La enseñanza y el aprendizaje de la teoría especial de la relatividad en el nivel medio/polimodal*. Universidade de Burgos, Burgos.
- Arriasecq, I., & Greca, I. M. (2004). Enseñanza de la teoría de la relatividad especial en el ciclo polimodal: Dificultades manifestadas por los docentes y textos de uso habitual. *Revista Electrónica De Enseñanza De Las Ciencias*, 3, 211–227.
- Astolfi, J. P., Darot, É., Vogel, Y. G., & Toussaint, J. (2008). *Mots-clés de la didactique des sciences* (2nd ed.). Bruxelles: De Boeck.
- Ausubel, D. (2003). *Aquisição e retenção de conhecimentos: Uma perspectiva cognitiva*. Lisboa: Plátano.
- Bachelard, G. (2005). *A formação do espírito científico* (5 ed.). Rio de Janeiro: Contraponto.
- Berenguer, A. (1997). Errores comunes sobre relatividad entre los profesores de enseñanza secundaria. *Enseñanza De Las Ciencias*, 15(3), 301–307.
- Calado, J. (2011). *Haja luz! Uma história da química através de tudo*. Lisboa: Instituto Superior Técnico.
- Chevallard, Y. (1998). *La transposición didáctica: Del saber sabio al saber enseñado* (3rd ed.). Buenos Aires: AIQUE.
- Einstein, A. (1934). On the method of theoretical physics. *Philosophy of Science*, 1(2), 163–169.
- Einstein, A. (1981). *Como vejo o mundo* (11 ed.). Rio de Janeiro: Nova Fronteira. Retrieved from [http://museumaconicoparanaense.com/MMPRaiz/Biblioteca/2006_Albert_Einstein_Como_vejo_o_mundo\(pdf\)\(rev\).pdf](http://museumaconicoparanaense.com/MMPRaiz/Biblioteca/2006_Albert_Einstein_Como_vejo_o_mundo(pdf)(rev).pdf)
- Feynman, R., Leighton, R. B., & Sands, M. (1963). *The feynman lectures on physics* (Vol. I). Addison-Wesley.
- French, A. P. (1998). The nature of physics. In A. Tiberghien, L. Jossem, & J. Barojas (Eds.), *Connecting research in physics education with teacher education* (Vol. 1, pp. 1–16). International Commission on Physics Education.
- Giere, R. N. (1989). A natureza da ciência: Uma perspectiva iluminista pós-moderna. *Colóquio Ciências*, 72–84.
- Giere, R. N. (2004). How models are used to represent reality. *Philosophy of Science*, 71, 742–752.
- Gowin, D. B. (1981). *Educating*. Ithaca: Cornell University Press.
- Gowin, D. B., & Alvarez, M. C. (2005). *The art of educating with v diagrams*. Cambridge University Press.
- Hewson, P. (1982). A case study of conceptual change in special relativity: The influence of prior knowledge in learning. *European Journal of Science Education*, 4(61), 61–78.
- Hodson, D. (2003). *Teaching and learning science: towards a personalized approach*. Oxford.
- Holton, G., Rutherford, J., & Watson, F. (1978). *Projeto física, unidade 1: Conceitos de movimento (texto*

- e manual de experiências e actividades*). Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.
- Hosson, C., Kermen, I., & Parizot, E. (2010). Exploring students' understanding of reference frames and time in Galilean and special relativity. *European Journal of Physics*, 31(6), 1527–1538. <http://doi.org/10.1088/0143-0807/31/6/017>
- Jenkins, E. (1991). History of science education. In A. Lewy (Ed.), *The international encyclopedia of curriculum* (pp. 903–911). Pergamon Press.
- Leach, J., & Scott, P. (2010). Learning science. In P. Peterson, E. Baker, & B. McGraw (Eds.), *International encyclopedia of education* (3rd ed., Vol. 5, pp. 387–393). Oxford: Elsevier.
- Matthews, M. R. (1992). History, philosophy, and science teaching: The present rapprochement¹. *Science Education*, 11–47.
- Matthews, M. R. (2015). *Science teaching: The contribution of history and philosophy of science, 20th anniversary revised and expanded edition* (2nd ed.). New York: Routledge.
- Montimer, E. (1995). Conceptual change or conceptual profile change? *Science Education*, 4, 267–285.
- Moreira, M. A. (1988). Mapas conceituais e aprendizagem significativa. *O Ensino, Revista Galáico Portuguesa De Sócio-Pedagogia E Sócio-Linguística*, 87–95.
- Moreira, M. A. (2009). *Subsídios teóricos para o professor pesquisador em ensino de ciências: Comportamentalismo, construtivismo e humanismo* (1st ed.). Porto Alegre.
- Moreira, M. A. (2012). Al final qué es aprendizaje significativo? *Revista Currículum*, 25, 29–56.
- Moreira, M. A. (2013). Aprendizagem significativa em mapas conceituais. *Textos De Apoio Ao Professor De Física*, 24(6), 1–55.
- Moreira, M. A., & Greca, I. M. (2003). A mudança conceitual: Análise crítica e propostas à luz da teoria da aprendizagem significativa. *Ciência E Educação*, 9(2), 301–315.
- Moreira, M. A., Caballero, M., & Rodríguez, M. (1997). Aprendizagem significativa: um conceito subjacente (pp. 19–44). Presented at the Actas del Encuentro Internacional sobre el Aprendizaje Significativo, Burgos.
- Novak, J. D., & Gowin, D. B. (1996). *Aprender a aprender* (1st ed.). Lisboa: Plátano Edições Técnicas.
- Pais, A. (1993). *Subtil é o senhor: Vida e pensamento de albert einstein*. Lisboa: Gradiva.
- Pérez, H., & Solbes, J. (2003). Algunos problemas en la enseñanza de la relatividad. *Enseñanza De Las Ciencias*, (1), 135–146.
- Pfundt, H., & Duit, R. (2009). *Bibliography: Students' alternative frameworks and science education*. Kiel: Institute for Science Education.
- Piaget, J. (1965). *The origins of intelligence in children* (3rd ed.). New York: International Universities Press.
- Piaget, J. (1977). *La naissance de l'“ intelligence chez l'” enfant* (9 ed.). Delachaux et Niestlé.
- Planck, M. (1950). *Scientific autobiography and other papers*. London: Williams & Norgate.
- Poincaré, H. (1900). Relations entre la physique expérimentale et la physique mathématique. In C. Guillaume & L. Poincaré (Eds.), (Vol. 1, pp. 1–29). Presented at the Congrès International de Physique.
- Posner, G., Strike, K., Hewson, P., & Gertzog, W. (1982). Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66(2), 211–227.

- Rodrigues, T. T. (2015). Sobre o ensino da teoria da relatividade restrita. In C. Caballero, J. A. M. Villagra, & M. A. Moreira (Eds.), (pp. 385–396). Presented at the VII Encuentro Internacional sobre Aprendizaje Significativo. V Encuentro Iberoamericano Sobre Investigación en Enseñanza de las Ciencias, Burgos.
- Rutherford, J., & Ahlgren, A. (1995). *Ciência para todos*. Lisboa: Gradiva.
- Sagan, C. (1984). *Cosmos* (1st ed.). Lisboa: Gradiva.
- Saltiel, E., & Malgrange, J. L. (1980). ‘Spontaneous’ ways of reasoning in elementary kinematics. *European Journal of Physics*, 73–80.
- Scherr, R. E., Shaffer, P. S., & Vokos, S. (2001). Student understanding of time in special relativity: Simultaneity and reference frames. *American Journal of Physics*, 69(S1), S24. <http://doi.org/10.1119/1.1371254>
- Scherr, R. E., Shaffer, P. S., & Vokos, S. (2002). The challenge of changing deeply-held student beliefs about the relativity of simultaneity. *American Journal of Physics*, 70(12), 1238–1248.
- Scott, Philip. (1987). The process of conceptual change in science: A case study of the development of a secondary pupil's ideas relating to matter. In J. D. Novak (Ed.), (Vol. II, pp. 404–419). Presented at the Second International Seminar Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics, Ithaca.
- Selçuk, G. S. (2011). Addressing pre-service teachers' understandings and difficulties with some core concepts in the special theory of relativity. *European Journal of Physics*, 32(1), 1–13. <http://doi.org/10.1088/0143-0807/32/1/001>
- Sfard, A. (1998). On two metaphors for learning and the dangers of choosing just one. *Educational Researcher*, 27(2), 4–13. <http://doi.org/10.3102/0013189X027002004>
- Sharma, A., & Anderson, C. W. (2009). Recontextualization of science from lab to school: Implications for science literacy. *Science Education*, 18(9), 1253–1275. <http://doi.org/10.1007/s11191-007-9112-8>
- Shodor Education Foundation. (2005). Project proposal. Retrieved from <http://www.shodor.org/succeedhi/succeedhi/proposal.html>
- Siqueira, M., & Pietrocola, M. (2006). A transposição didática aplicada a teoria contemporânea: A física de partículas elementares no ensino médio (pp. 1–10). Presented at the X Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Física, Londrina.
- Siqueira, M., Brockington, G., & Pietrocola, M. (2008). Marcadores estruturantes: Proposta de um instrumento de análise para a elaboração de cursos física moderna e contemporânea para o ensino médio. *Universidade De São Paulo*, 1–12.
- Taber, K. S. (2015). Alternative conceptions, frameworks e misconceptions. In R. Gunstone (Ed.), *Encyclopedia of science education* (pp. 1–5). Springer.
- Teodoro, V. D., & Neves, R. G. (2011). Mathematical modelling in science and mathematics education. *Computer Physics Communications*, 182(1), 8–10. <http://doi.org/10.1016/j.cpc.2010.05.021>
- Teodoro, V. D., Schwartz, J. L., & Neves, R. G. (2012). Cognitive artifacts, tecnologia, and physics learning. In N. M. Seel (Ed.), *Encyclopedia of the sciences of learning* (pp. 572–576). London.
- Valadares, A. M. (2005). *A relatividade restrita no ensino secundário. Uma estratégia: Fundamentos e viabilidade*. Universidade Aberta, Lisboa.
- Valadares, J. (1995). *Concepções alternativas no ensino da física à luz da filosofia da ciência*. Universidade Aberta, Lisboa.

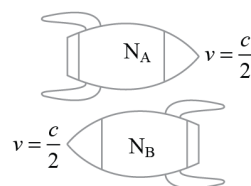
- Valadares, J. (2012). Os modelos investigativos atuais no ensino da física e o recurso à história e filosofia da ciência. In L. O. Q. Peduzzi, A. F. Martins, & J. M. H. Ferreira (Eds.), *Temas de história e filosofia da ciência no ensino* (pp. 85–121). Natal: Editora UFRN.
- Viennot, L. (1979). *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire*. Paris: Hermann.
- Villani, A. (1980). Análise de um curso de introdução à relatividade. *Revista Brasileira De Ensino De Física*, 2(1), 21–35.
- Villani, A., & Arruda, S. M. (1998). Special theory of relativity, conceptual change and history of science. *Science Education*, 7, 85–100.
- Villani, A., & Pacca, J. (1987). Students' spontaneous ideas about the speed of light. *International Journal of Science Education*, 9, 55–66. <http://doi.org/10.1080/0950069870090107>
- Villani, A., & Pacca, J. (1990). Spontaneous reasoning of graduate students. *International Journal of Science Education*, 12(5), 589–600.
- Vygotsky, L. S. (1978). *Mind in society: The development of higher psychological processes*. Cambridge: Harvard University Press.

Anexos

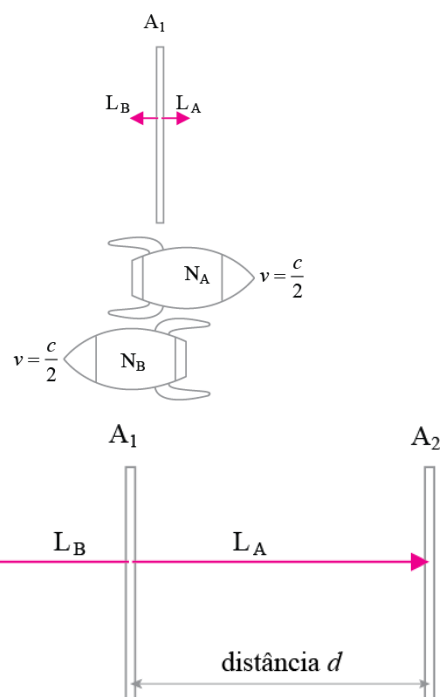
Anexo I — Teste aplicado a professores e alunos

Questão 1

Duas naves espaciais, N_A e N_B , viajam com a velocidade $v = c/2$, em sentidos opostos ao longo da mesma linha reta. “ c ” representa a velocidade da luz no vácuo.



Quando passam pela antena A_1 , esta emite um sinal luminoso L_B no sentido em que viaja a nave N_B e, simultaneamente, outro sinal luminoso L_A no sentido em que viaja a nave N_A .



No referencial da Terra, a que distância da antena A_1 se encontrarão cada uma das naves N_A e N_B e o sinal L_A quando L_A atinge a antena A_2 , que está à distância d da antena A_1 ? Porquê?

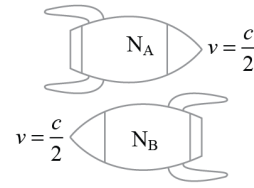
Sinal L_A :

Nave N_A :

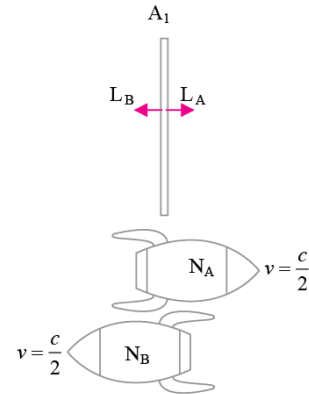
Nave N_B :

Questão 2

Duas naves espaciais, N_A e N_B , viajam com a velocidade $v = c/2$, em sentidos opostos ao longo da mesma linha reta. “ c ” representa a velocidade da luz no vácuo.

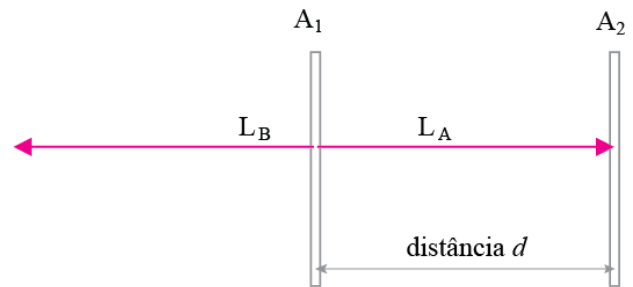


Quando passam pela antena A_1 , esta emite um sinal luminoso L_B no sentido em que viaja a nave N_B e, simultaneamente, outro sinal luminoso L_A no sentido em que viaja a nave N_A .



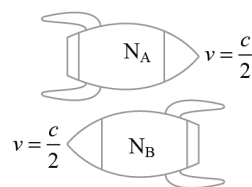
Suponha que viajava na nave N_B .

Quando o sinal L_A atingisse a antena A_2 , os sinais L_A e L_B estão ambos à mesma distância de si ou a distância de si a L_A é diferente da distância de si a L_B ? Porquê?

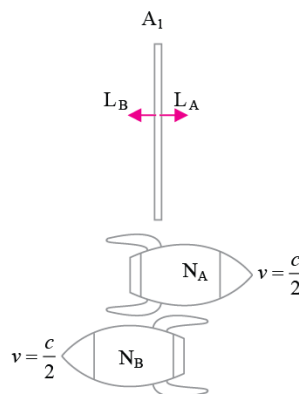


Questão 3

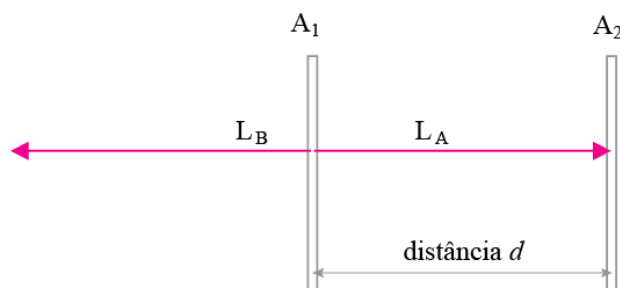
Duas naves espaciais, N_A e N_B , viajam com a velocidade $v = c/2$, em sentidos opostos ao longo da mesma linha reta. “ c ” representa a velocidade da luz no vácuo.



Quando passam pela antena A_1 , esta emite um sinal luminoso L_B no sentido em que viaja a nave N_B e, simultaneamente, outro sinal luminoso L_A no sentido em que viaja a nave N_A .



Suponha que viajava na nave N_A . Quando o sinal L_A atingisse a antena A_2 , os sinais L_A e L_B estão ambos à mesma distância de si ou a distância de si a L_A é diferente da distância de si a L_B ? Porquê?



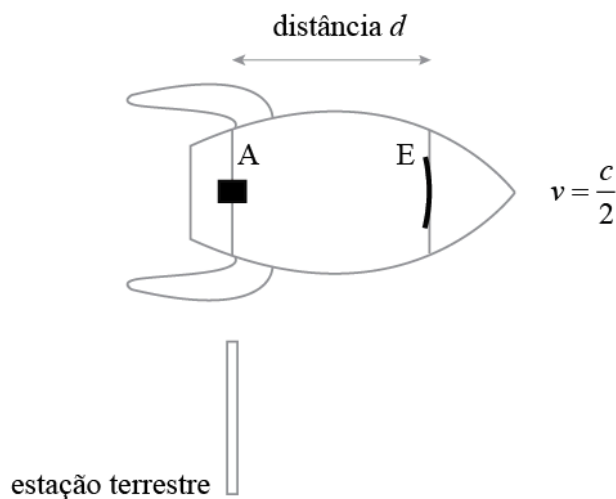
Questão 4

Uma nave possui uma antena A na extremidade traseira e um espelho E na sua extremidade dianteira. A distância entre a antena A e o espelho E é d .

A nave viaja a uma velocidade $v = c/2$ e passa por cima de uma estação terrestre, na vertical.

Nesse instante, a antena A emite um sinal luminoso.

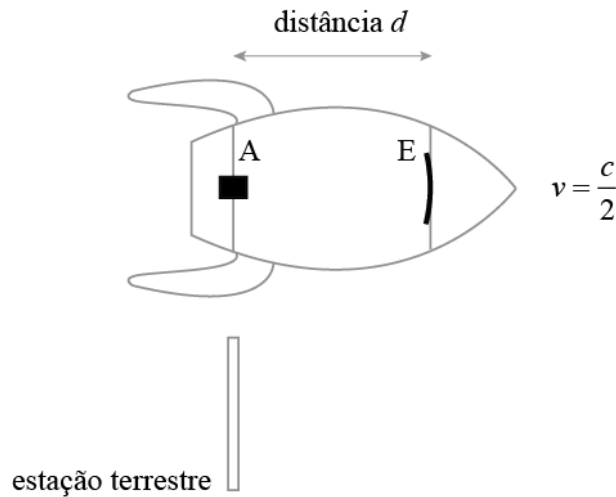
O sinal atinge o espelho E, é refletido e regressa à antena A.



Para alguém que viaje na nave, o sinal luminoso demora mais tempo a ir da antena A ao espelho E ou a regressar do espelho E à antena A? Porquê?

Questão 5

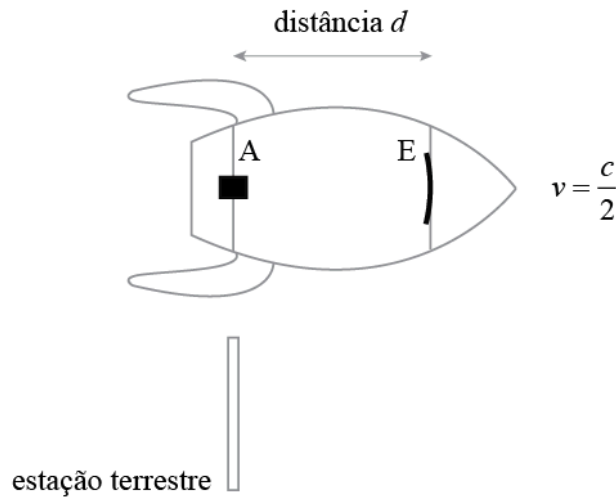
Uma nave possui uma antena A na extremidade traseira e um espelho E na sua extremidade dianteira. A distância entre a antena A e o espelho E é d .
A nave viaja a uma velocidade $v = c/2$ e passa por cima de uma estação terrestre, na vertical.
Nesse instante, a antena A emite um sinal luminoso.
O sinal atinge o espelho E, é refletido e regressa à antena A.



Para alguém que esteja na estação terrestre, o sinal luminoso demora mais tempo a ir da antena A ao espelho E ou a regressar do espelho E à antena A? Porquê?

Questão 6

Uma nave possui uma antena A na extremidade traseira e um espelho E na sua extremidade dianteira. A distância entre a antena A e o espelho E é d .
A nave viaja a uma velocidade $v = c/2$ e passa por cima de uma estação terrestre, na vertical.
Nesse instante, a antena A emite um sinal luminoso.
O sinal atinge o espelho E, é refletido e regressa à antena A.



O sinal luminoso demora mais tempo a percorrer a distância da antena A ao espelho E para alguém na nave ou para alguém na estação terrestre? Porquê?

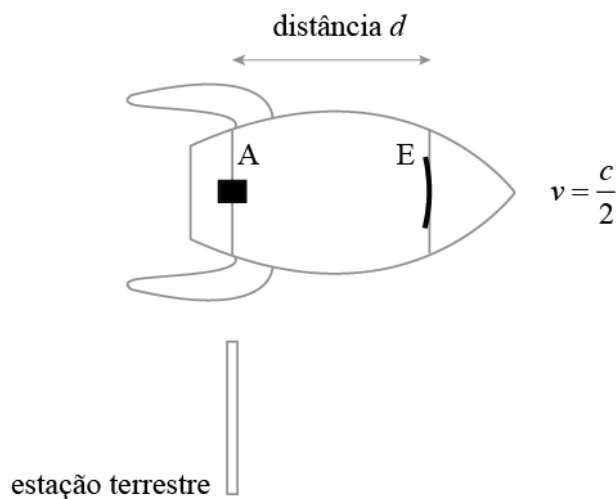
Questão 7

Uma nave possui uma antena A na extremidade traseira e um espelho E na sua extremidade dianteira. A distância entre a antena A e o espelho E é d .

A nave viaja a uma velocidade $v = c/2$ e passa por cima de uma estação terrestre, na vertical.

Nesse instante, a antena A emite um sinal luminoso.

O sinal atinge o espelho E, é refletido e regressa à antena A.



O sinal luminoso demora mais tempo a percorrer a distância do espelho E à antena A para alguém na nave ou para alguém na estação terrestre? Porquê?

Anexo II — Inquérito por questionário aplicado a professores

Questionário

Muito obrigado pela sua colaboração.
Teresa Rodrigues, teresactr@gmail.com

O presente questionário insere-se num projeto de doutoramento na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e tem como objetivo a avaliação do ensino da Teoria da Relatividade Restrita (TRR) bem como a avaliação de uma proposta didática sobre esse ensino. Será garantido o anonimato.

A lista seguinte identifica algumas questões do estudo:

- Que estrutura curricular é adequada à aprendizagem da TRR?
- Quais são as principais dificuldades dos professores?
- Quais são os materiais que os professores utilizam na preparação das aulas?
- Qual é a importância da aprendizagem da TRR no ensino secundário?

1 Caracterização

1. Género.

- ☐ Feminino
☐ Masculino

2. Habilitações Académicas. Selecione todas as que se apliquem.

- ☐ Bacharelato
☐ Licenciatura pré-Bolonha
☐ Licenciatura pós-Bolonha
☐ Pós-Graduação
☐ Mestrado pré-Bolonha
☐ Mestrado pós-Bolonha
☐ Doutoramento em área científica
☐ Doutoramento em área educacional
☐ Pós-Doutoramento
☐ Outra:

3. Qual é a designação, incluindo especialidade, dessas habilitações académicas (e.g., Licenciatura em ..., Mestrado em ..., Doutoramento em ...)?

4. Situação profissional. Escolha uma das seguintes opções.

- ☐ Professor do Quadro de Agrupamento/Escola (PQA/PQE)
☐ Professor de Quadro de Zona Pedagógica (PQZP)
☐ Professor Contratado
☐ Outra situação (aposentado, etc.)

5. Durante quantos anos lecionou as seguintes disciplinas?

- ano(s), Ciências Físico-Químicas no ensino básico (ou equivalente)
 ano(s), Física e Química A no ensino secundário (ou equivalente)
 ano(s), Física no 12.º ano, incluindo os últimos 8 anos (programa em vigor)
 ano(s), Física no 12.º ano, apenas nos últimos 8 anos (programa em vigor)

6. Tempo de serviço em 31 de agosto de 2013: anos.

2 Sobre a proposta didática apresentada

7. Qual é a **avaliação global** que faz da proposta didática (1 discorda totalmente, 10 concorda totalmente)?

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Permite a reflexão sobre a <u>importância da história da ciência</u> na sua aprendizagem.										
Apresenta a <u>evolução histórica dos conceitos</u> mais importantes.										
Realça <u>concepções errôneas históricas</u> .										
Possibilita a discussão de <u>mudanças</u> do conhecimento científico.										
Proporciona uma perspectiva da ciência como um <u>processo social</u> em construção.										
Refere os <u>cientistas</u> que se distinguiram na construção dos conhecimentos tratados.										
Contribui para uma <u>visão crítica</u> da ciência e do seu desenvolvimento.										
Em temas de conteúdo foram <u>contemplados os conceitos fundamentais</u> da TRR.										
A <u>sequência</u> das atividades é <u>adequada</u> .										
A estratégia, pela forma e conteúdo, ajuda a <u>motivar</u> os alunos para a aprendizagem da Física.										

Se necessário, utilize o espaço seguinte para expressar outro qualquer aspeto referente a este item:

8. Qual é a avaliação que faz da **abordagem da experiência Michelson-Morley**, na proposta didática (1 discorda totalmente, 10 concorda totalmente)?

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A exploração da experiência de <u>Michelson-Morley</u> é <u>indispensável</u> nesta temática.										
Está <u>adequada</u> aos conhecimentos prévios dos alunos.										
As atividades são <u>suficientemente diversificadas</u> e apelativas para interessar os alunos.										
A <u>sequência</u> das atividades é <u>adequada</u> .										
A sequência de atividades apresenta <u>complexidade crescente</u> , tendo em cada passo uma exploração e análise pormenorizada.										
A sequência reforça o <u>desenvolvimento de competências específicas</u> antes de competências gerais.										
As <u>múltiplas representações</u> facilitam a construção de relações entre essas representações de forma a corrigir erros e a consolidar a aprendizagem do aluno.										
As <u>questões</u> colocadas auxiliam o aluno no processo de <u>reflexão crítica</u> facilitando a sua aprendizagem sobre o tema.										

Se necessário, utilize o espaço seguinte para expressar outro qualquer aspeto referente a este item:

9. Qual é a avaliação que faz da **abordagem da simultaneidade**, na proposta didática (1 discorda totalmente, 10 concorda totalmente)?

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Está adequada aos <u>conhecimentos prévios</u> dos alunos.										
As atividades são <u>suficientemente diversificadas</u> e apelativas para interessar os alunos.										
A <u>sequência</u> das atividades é <u>adequada</u> .										
A sequência de atividades apresenta <u>complexidade crescente</u> , tendo em cada passo uma exploração e análise pormenorizada.										
A sequência reforça o <u>desenvolvimento de competências específicas</u> antes de competências gerais.										
As <u>múltiplas representações</u> facilitam a construção de relações entre essas representações de forma a corrigir erros e a consolidar a aprendizagem do aluno.										
As <u>questões</u> colocadas auxiliam o aluno no processo de <u>reflexão crítica</u> facilitando a sua aprendizagem sobre o tema.										
Os <u>diagramas de espaço-tempo</u> ajudam a corrigir erros e a consolidar a aprendizagem do aluno.										

Se necessário, utilize o espaço seguinte para expressar outro qualquer aspeto referente a este item:

10. Qual é a avaliação que faz da **abordagem da dilatação do tempo**, na proposta didática (1 discorda totalmente, 10 concorda totalmente)?

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Está adequada aos <u>conhecimentos prévios</u> dos alunos.										
As atividades são <u>suficientemente diversificadas</u> e apelativas para interessar os alunos.										
A <u>sequência</u> das atividades é adequada.										
A sequência de atividades apresenta <u>complexidade crescente</u> , tendo em cada passo uma exploração e análise pormenorizada.										
A sequência reforça o <u>desenvolvimento de competências específicas</u> antes de competências gerais.										
As <u>múltiplas representações</u> facilitam a construção de relações entre essas representações de forma a corrigir erros e a consolidar a aprendizagem do aluno.										
As <u>questões</u> colocadas auxiliam o aluno no processo de <u>reflexão crítica</u> facilitando a sua aprendizagem sobre o tema.										
A <u>matematização</u> da dilatação do tempo é apresentada de uma forma adequada para uma aprendizagem significativa.										

Se necessário, utilize o espaço seguinte para expressar outro qualquer aspeto referente a este item:

11. Qual é a avaliação que faz da abordagem da **contração do espaço**, na proposta didática (1 discorda totalmente, 10 concorda totalmente)?

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Está adequada aos <u>conhecimentos prévios</u> dos alunos.										
As atividades são <u>suficientemente diversificadas</u> e apelativas para interessar os alunos.										
A <u>sequência</u> das atividades é <u>adequada</u> .										
A sequência de atividades apresenta <u>complexidade crescente</u> , tendo em cada passo uma exploração e análise pormenorizada.										
A sequência reforça o <u>desenvolvimento de competências específicas</u> antes de competências gerais.										
As <u>múltiplas representações</u> facilitam a construção de relações entre essas representações de forma a corrigir erros e a consolidar a aprendizagem do aluno.										
As <u>questões</u> colocadas auxiliam o aluno no processo de <u>reflexão crítica</u> facilitando a sua aprendizagem sobre o tema.										
Os <u>diagramas de espaço-tempo</u> ajudam a corrigir erros e a consolidar a aprendizagem do aluno.										
A <u>matematização</u> da contração do espaço é apresentada de uma forma adequada para uma aprendizagem significativa.										

Se necessário, utilize o espaço seguinte para expressar outro qualquer aspeto referente a este item:

3 Sobre a aprendizagem da TRR no ensino secundário

12. Qual é a avaliação que faz sobre a importância da aprendizagem da TRR no ensino secundário (1 discorda totalmente, 10 concorda totalmente)?

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Motiva os alunos para a aprendizagem da Física.										
Ajuda os alunos numa progressão mais bem sucedida pelo ensino universitário.										
Ajuda os alunos a se questionarem acerca do modo de pensar o Mundo.										
Proporciona uma visão mais correta sobre o papel da comunidade científica na construção do conhecimento científico.										
Contribui para a literacia científica.										
Enquadra-se numa perspectiva Ciência-Tecnologia-Sociedade-Ambiente.										
A TRR como tema fundamental da Física Moderna deveria estar no programa de 12.º ano de Física.										

Se necessário, utilize o espaço seguinte para expressar outro qualquer aspeto referente a este item:

13. Quais foram as dificuldades que encontrou na leção da TRR? Selecione todas as que se apliquem.

- ☐ Durante a formação académica não foi abordado este tema.
- ☐ Existe pouca formação disponível nesta temática.
- ☐ Existem poucos materiais disponíveis para a leção da TRR.
- ☐ Os conceitos relativistas são conceptualmente difíceis.
- ☐ Os alunos não estão preparados para interpretar os conceitos relativistas.
- ☐ Outras dificuldades. Qual ou quais?

14. Que materiais utilizou para planificar as aulas e, ou, como recurso nas suas aulas? Selecione todos os que se apliquem.

☐ Manual adotado. Qual?

☐ Outros manuais. Qual ou quais?

Artigos científicos. Por exemplo:

- ☐ *On the relative motion of the earth and the luminiferous ether*, Albert Michelson e Edward Morley
- ☐ *Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento*, Albert Einstein
- ☐ Outros artigos científicos. Qual ou quais?

Livros de Física. Por exemplo:

- ☐ *Modern physics*, Paul Tipler e Ralph Liewellyn
- ☐ *Fundamentos de física: ótica e física moderna*, David Halliday, Robert Resnick e Jearl Walker

- ☐ *Introdução à física*, Jorge Dias de Deus, Mário Pimenta, Ana Noronha, Teresa Peña e Pedro Brogueira
- ☐ *Física*, Marcelo Alonso e Edward Finn
- ☐ *The modern revolutions in physics*, Benjamin Crowell (<http://ufdcimages.uflib.ufl.edu/AA/00/01/17/39/00001/ModernPhysics.pdf>)
- ☐ *Motion mountain, the adventure of physics*, Christoph Schiller (<http://www.motionmountain.net>)
- ☐ Outros livros de Física. Qual ou quais?

Livros de divulgação científica. Por exemplo:

- ☐ *O annus mirabilis de Einstein: cinco artigos que revolucionaram a física*, John Stachel
- ☐ *O novo mundo do sr. Tompkins*, George Gamow e Russell Stannard
- ☐ *O tempo e o espaço do tio Albert*, Russell Stannard
- ☐ *Nova física divertida*, Carlos Fiolhais
- ☐ *Cosmos*, Carl Sagan
- ☐ *A evolução da física*, Albert Einstein e Leopold Infeld
- ☐ Outros livros de divulgação. Qual ou quais?

Filmes e animações. Por exemplo:

- ☐ *Cosmos part 8: travels in space and time*, Carl Sagan (<http://www.youtube.com/watch?v=N7gGbTBJLgw>)
- ☐ *Everyday Einstein: GPS & Relativity* – Perimeter Institute for Theoretical Physics (<https://perimeterinstitute.ca/store/perimeter-inspirations/everyday-einstein-gps-relativity>)
- ☐ *Simultaneidade* (e.g., <http://www.youtube.com/watch?v=wteiuxyqtoM>)
- ☐ *Flash animations for physics*, Universidade de Toronto (<http://faraday.physics.utoronto.ca/GeneralInterest/Harrison/Flash/#relativity>)
- ☐ *Physics flashlets*, Michael Fowler (http://galileoandeinstein.physics.virginia.edu/more_stuff/flashlets/mmexpt6.htm; http://galileoandeinstein.physics.virginia.edu/more_stuff/flashlets/lightclock.swf)
- ☐ Outros filmes e animações. Qual ou quais?

Páginas da Internet. Por exemplo:

- ☐ *Center for history of physics*, A. Einstein (<http://www.aip.org/history/einstein>)
- ☐ Outras. Qual ou quais?

☐ Outros recursos. Qual ou quais?

15. Utilize o espaço seguinte para expressar qualquer outro aspecto que considere relevante no âmbito deste questionário.

Síntese da Sequência Didática

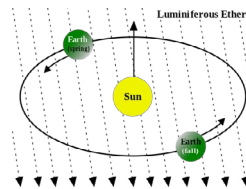
A Experiência de Michelson-Morley (1887)

1 O que é o éter?

1.1 Os físicos da segunda metade do século XIX acreditavam que as ondas de luz se propagavam através de uma substância ou corpo material misterioso a que deram o nome de éter, uma palavra grega que significa um material subtil das regiões atmosféricas.

1.2 Ao admitir a existência do éter disseminado pelo Universo como suporte da luz, os físicos também teriam um suporte para os referenciais em repouso absoluto.

1.3 O movimento da Terra (ou outro corpo) em relação ao éter seria um movimento absoluto.

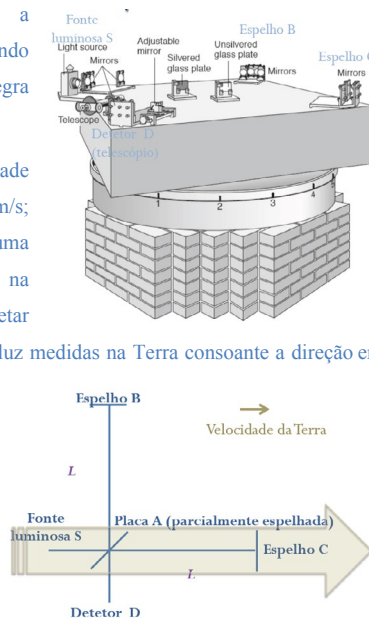


2 Interferómetro de Michelson-Morley

2.1 Em 1887, Albert Michelson e Edward Morley construíram um dispositivo (interferómetro) que pretendia determinar a velocidade da Terra em relação ao éter, utilizando sinais luminosos (na Terra), de acordo com a regra da adição de velocidades de Galileu.

2.2 Considerando que: a luz tem uma velocidade constante relativamente ao éter, c , de 300 000 km/s; a Terra move-se através do éter, com uma velocidade, v , de 30 km/s. Então, com base na adição das velocidades, seria possível detetar experimentalmente diferenças de velocidade de luz medidas na Terra consoante a direção em que esta se propagasse, no referencial do éter.

2.3 A figura ao lado mostra o esquema do interferómetro de Michelson-Morley. Um feixe luminoso é emitido pela fonte S. Ao chegar à placa A, parte do feixe é refletido para o

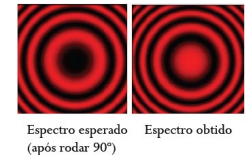


espelho B e parte do feixe é transmitido para o espelho C. Ao chegarem aos espelhos B e C, os feixes são refletidos para a placa A, onde são novamente transmitidos ou refletidos e recombinados atingindo o detetor D.

3 Os resultados da experiência de Michelson- Morley

3.1 A diferença de tempo, na recombinação dos dois feixes, deveria ser detetada no detetor D. **Mas tal não aconteceu.**

3.2 O aparelho foi rodado de 90°, para anular variações devido a diferenças no tamanho dos 2 braços. Mas nenhuma alteração nas franjas de interferência foi detetada pelo detetor D.



4 A explicação de Lorentz

4.1 Fitzgerald e Lorentz colocaram a hipótese dos corpos em movimento se contraírem na direção do movimento. Se o comprimento de um objeto em repouso é L_0 , quando ele se move com velocidade v , será L_1 na direção do movimento e dado pela expressão:

$$L_1 = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

4.2 Aplicando a expressão de Lorentz, verifica-se que os tempos que os feixes de luz demoram a percorrer os dois braços do interferómetro são iguais, explicando assim os resultados da experiência de Michelson-Morley.

5 A explicação de Einstein e a Teoria da Relatividade Restrita

5.1 A contração dos corpos na direção do movimento, aparece como uma consequência necessária dos dois postulados propostos por Einstein e nos quais, se baseia a Teoria da Relatividade Restrita (TRR).

5.2 No artigo “Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento”, publicado em 1905, Einstein propõe 2 postulados:

Princípio da relatividade: As leis da física são as mesmas em todos os referenciais inerciais. Não existe um referencial absoluto.

Princípio da constância da velocidade da luz: O módulo da velocidade da luz no vácuo tem o mesmo valor c em todas as direções e em todos os referenciais inerciais.

5.3 A Teoria da Relatividade Restrita é aplicada apenas a **referenciais inerciais** - referenciais em que as Leis de Newton são válidas (referenciais que se movem com velocidade relativa constante, não podem sofrer acelerações relativas).

5.4 Com estes dois postulados, Einstein:

- Amplia o postulado da relatividade de Galileu, incluindo não só as leis da mecânica, mas também as do eletromagnetismo.
- Resolve o problema da incompatibilidade da eletrodinâmica de Maxwell-Lorentz com a mecânica clássica (regra da adição das velocidades de Galileu).

5.5 Consequências da TRR

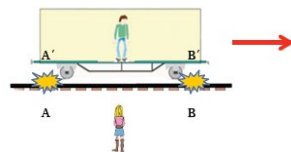
- A dilatação do tempo.
- A contração do espaço.
- Os acontecimentos são estudados tendo em conta 4 dimensões (x, y, z, t).
- A velocidade limite, c .
- A necessidade da existência do *éter* desaparece.

Simultaneidade dos Acontecimentos

6 Experiência imaginada para explicar a *simultaneidade dos acontecimentos*

6.1 As diversas escalas existentes nem sempre permitem medições reais, por isso recorre-se a *experiências imaginadas*, uma tradição que já vem de Galileu e que Einstein também usou.

6.2 Nesta experiência imaginada que utiliza uma carruagem a mover-se com uma velocidade da ordem de grandeza da velocidade da luz, temos de distinguir:



- **Os referenciais:** Um referencial de inércia fixo na Terra e um referencial de inércia fixo numa carruagem que se movimenta relativamente ao solo com velocidade $c/2$.
- **Os observadores:** A Alice, observadora ligada ao referencial fixo na Terra e o David, observador ligado ao referencial fixo na carruagem.

3

➤ **Os acontecimentos:** Quando os pontos A e B coincidem com os pontos A' e B', os emissores flash colocados nos pontos A e B do carril emitem 2 sinais luminosos.

6.3 Para a Alice, no referencial inercial fixo na Terra:

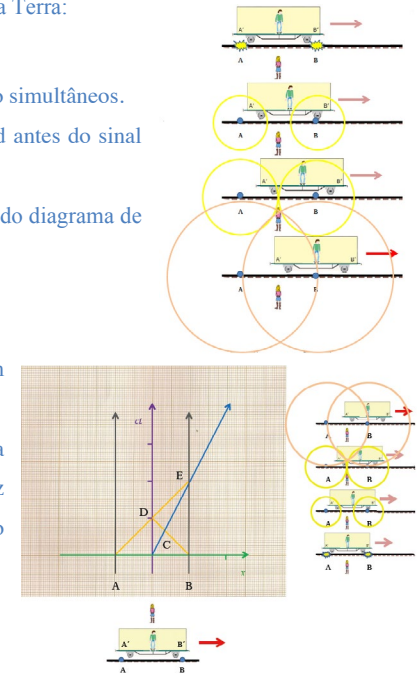
- O David está a mover-se para a direita.
- A emissão dos dois sinais pelas fontes são simultâneos.
- O sinal proveniente de B chega ao David antes do sinal proveniente de A.

6.4 Representação da mesma situação utilizando diagrama de espaço-tempo, no referencial da Alice.

➤ Os acontecimentos são simultâneos.

➤ Visualiza os dois feixes de luz em simultâneo.

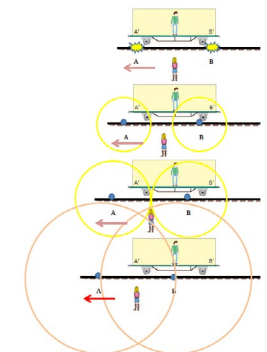
➤ Afirma que o David, se desloca para a direita e vê primeiro o feixe de luz proveniente do emissor B. E depois, vê o feixe de luz proveniente do emissor A.



6.5 Dois acontecimentos são simultâneos num referencial quando ocorrem ao mesmo tempo nesse referencial. Em geral, acontecimentos simultâneos não são observados ao mesmo tempo, devido a diferentes tempos de viagem da luz desde o ponto onde o evento ocorreu até ao observador.

6.6 Para o David, no referencial inercial fixo numa carruagem:

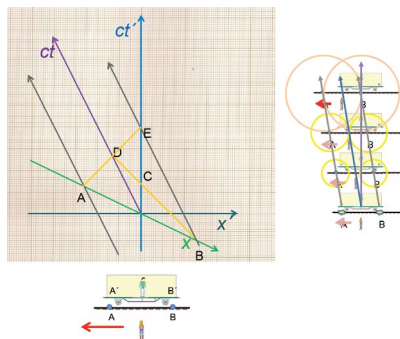
- A Alice está a mover-se para a esquerda.
- O sinal B chega em primeiro lugar e posteriormente chega o sinal A.
- Como se encontra à mesma distância de A' e B', conclui que a emissão dos dois sinais não são simultâneos.



4

6.7 Representação da mesma situação utilizando diagrama de espaço-tempo, no referencial do David.

- Os acontecimentos não são simultâneos.
- Visualiza primeiro o feixe de luz proveniente do emissor B, e só depois vê o feixe de luz proveniente do emissor A.
- Como se encontra à mesma distância de A' e B', conclui que a emissão dos dois sinais não são simultâneos.



7 Diagrama de espaço-tempo para vários referenciais

7.1 Existe uma quantidade que se mantém invariante quando mudamos de referencial de inércia que é o intervalo no espaço-tempo, s , entre dois acontecimentos.

7.2 Definimos essa quantidade invariante como sendo:

$$s^2 = c^2(\Delta t)^2 - (\Delta x)^2$$

7.3 Para existir correspondência entre o diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice (referencial Terra) e o diagrama de espaço-tempo no referencial do David (referencial carruagem), temos de calibrar os eixos do referencial fixo na carruagem atendendo que o intervalo de espaço-tempo é invariante, ou seja:

$$c^2\Delta t'^2 - \Delta x'^2 = c^2\Delta t^2 - \Delta x^2$$

7.4 Podemos concluir que:

- Podemos desenhar um diagrama de espaço-tempo com eixos da posição e do tempo para vários referenciais, desde que se mantenha a condição do intervalo de espaço-tempo invariante.
- Os eixos dos tempos e das posições dependem dos referenciais.
- Dois acontecimentos simultâneos num referencial, podem não ser simultâneos noutro referencial.

Coordenadas do acontecimento F nos dois referenciais

$$ct = 1 \text{ km}$$

$$x = 0.5 \text{ km}$$

$$x' = 0 \text{ km}$$

$$c^2\Delta t'^2 - \Delta x'^2 = c^2\Delta t^2 - \Delta x^2$$

$$1^2 - 0.5^2 = c^2\Delta t'^2 - 0^2$$

$$c^2\Delta t'^2 = 0.75$$

$$c\Delta t' = 0.87 \text{ km}$$

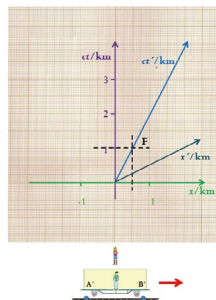
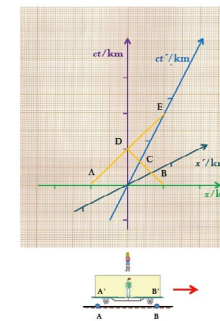


Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice
Quais são os valores lidos nos eixos para os acontecimentos A, B, C, D e E?

	x/km	ct/km
A	1.00	0.00
B	1.00	0.00
C	0.35	0.65
D	0.00	1.00
E	1.00	2.00



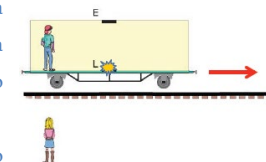
	x'/km	ct'/km
A	-1.20	0.60
B	1.20	-0.60
C	0.00	0.60
D	-0.60	1.20
E	0.00	1.70

Dilatação do Tempo

8 Experiência imaginada para explicar a dilatação do tempo

8.1 Nesta experiência imaginada utilizamos:

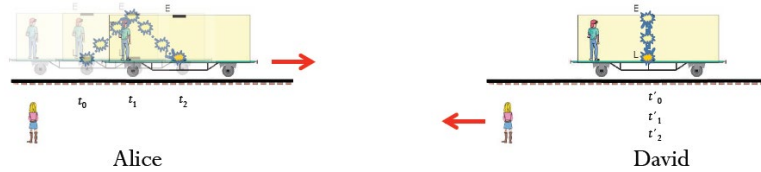
- **Os referenciais:** Um referencial de inércia fixo na Terra e um referencial de inércia fixo numa carruagem que se movimenta relativamente ao solo com velocidade $c/2$.
- **Os observadores:** A Alice, observadora ligada ao referencial fixo na Terra e o David, observador ligado ao referencial fixo na carruagem.
- **Os acontecimentos:** A emissão de um sinal luminoso pela lâmpada L na direção do espelho E, quando a Alice e o David passam um pelo outro. A reflexão do sinal luminoso no espelho E e regresso à lâmpada L.



8.2 Como veem a Alice e o David a trajetória do sinal luminoso?

- O trajeto do sinal luminoso observado pela Alice é diferente do trajeto do sinal luminoso observado pelo David.
- A Alice vê o sinal luminoso descrever uma trajetória inclinada em relação à horizontal em cada um dos percursos antes e depois da reflexão no espelho E.

- O David vê o sinal luminoso descrever uma trajetória vertical. Primeiro para cima até ao espelho E e depois para baixo regressando à lâmpada L.



8.3 Quais são as implicações da velocidade da luz ser igual nos dois referenciais?

Para a Alice a distância percorrida pelo sinal luminoso é maior do que para o David. Como a velocidade da luz é a mesma para os dois, os intervalos de tempo medidos nos referenciais da Alice e do David também vão ser diferentes.

8.4 Podemos concluir que:

- Os tempos medidos do acontecimento são diferentes, nos referenciais da Alice e do David.
- O tempo não é absoluto, é um conceito relativo.
- O referencial do David está em repouso em relação ao acontecimento (*tempo próprio*), pelo que o tempo medido no referencial da Alice é superior (referencial que não está em repouso em relação ao acontecimento).
- Este fenómeno é conhecido por **dilatação do tempo**.
- A equação que relaciona os tempos t e t' é a **equação da dilatação do tempo**.

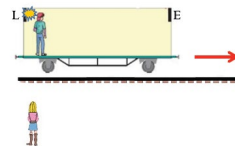
$$t = \frac{t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Contração do Espaço

9 Experiência imaginada para explicar a *contração do espaço*

9.1 Nesta experiência imaginada utilizamos:

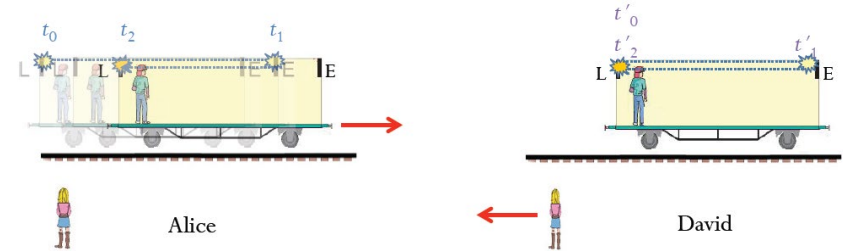
- **Os referenciais:** Um referencial de inércia fixo na Terra e um referencial de inércia fixo numa carruagem que se movimenta relativamente ao solo com velocidade $c/2$.



7

- **Os observadores:** A Alice, observadora ligada ao referencial fixo na Terra e o David, observador ligado ao referencial fixo na carruagem.
- **Os acontecimentos:** A emissão de um sinal luminoso pela lâmpada L na direção do espelho E, quando a Alice e o David passam um pelo outro. A reflexão do sinal luminoso no espelho E e regresso à lâmpada L.

9.2 Como veem a Alice e o David a trajetória do sinal luminoso?



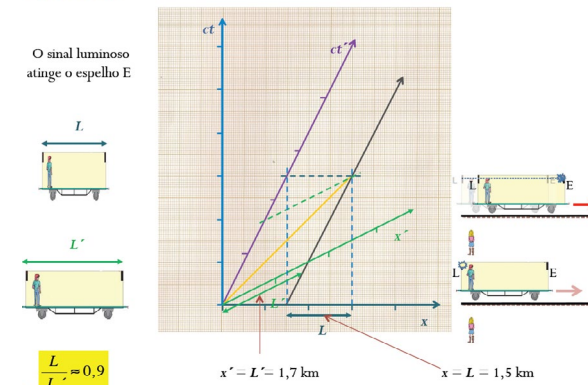
A Alice e o David veem o sinal luminoso descrever trajetórias diferentes.

9.3 Quais são as implicações da velocidade da luz ser igual nos dois referenciais?

- O comprimento da carruagem medido no referencial em repouso em relação ao acontecimento (L'), referencial do David, é diferente do comprimento medido noutro referencial (L).
- A relação entre os dois comprimentos é dada pela equação $L = L' \sqrt{1 - v^2/c^2}$
- Para uma velocidade v igual a $c/2$ vem: $L = 0,866 \times L'$

9.4 Representação do mesmo acontecimento utilizando diagrama de espaço-tempo, no referencial da Alice

Qual é a relação entre os comprimentos da carruagem medidos pela Alice e pelo David?



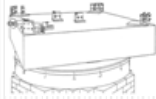
9.5 Podemos concluir que:

- O comprimento da carruagem medido pela Alice é diferente do comprimento da carruagem medido pelo David.
- O comprimento de um objeto (ou a distância medida) não é absoluto, é um conceito relativo.
- O David mede o *comprimento próprio* da carruagem, pois ele encontra-se em repouso em relação à carruagem.
- A Alice mede um comprimento menor porque encontra-se em movimento em relação ao referencial carruagem.
- Este fenómeno é conhecido por contração do espaço.
- A equação que relaciona os comprimentos L e L' é a **equação da contração do espaço**.

$$L_1 = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

- O comprimentos L é sempre menor que o comprimento L' porque v é sempre menor que a velocidade da luz c .
- No referencial Terra, a Alice tem dificuldade em medir as extremidades da carruagem em movimento, primeiro observa a extremidade dianteira e depois a extremidade traseira, causando uma contração do comprimento da carruagem.
- No referencial da carruagem o David (em repouso em relação à carruagem), não tem dificuldade em medir os extremos da carruagem

Abordagem da Experiência de Michelson-Morley



Os resultados negativos de uma das experiências mais famosas que revolucionou a maneira de ver o mundo



Albert Michelson (1852-1931)



Edward Morley (1838-1923)

À procura do éter ...

Os físicos da segunda metade do século XIX acreditavam que as ondas de luz se propagavam através de uma substância ou corpo material misterioso a que deram o nome de éter, uma palavra grega que significa um material subtil das regiões atmosféricas.

Aether (classical element)

From Wikipedia, the free encyclopedia

According to ancient and medieval science **aether** (Greek αἰθήρ *aithēr*[?]), also spelled **æther** or **ether**, is the material that fills the region of the **universe** above the **terrestrial sphere**.

2

À procura do éter ...

Os físicos da segunda metade do século XIX acreditavam que as ondas de luz se propagavam através de uma substância ou corpo material misterioso a que deram o nome de éter, uma palavra grega que significa um material subtil das regiões atmosféricas (Não confundir com o éter utilizado como analgésico).



"I first came across the concept of ether during my precocious reading of The Evolution of Physics. When I questioned my physics teacher about it, he told me not to be stupid, stating that "if everything were pervaded by ether we would all be anaesthetized."

(Magueijo, 2011)

3

À procura do éter ...

Existe realmente o éter?

Sabemos de onde provém a nossa crença do éter.

Quando a luz viaja para nós a partir de uma estrela distante ... já não está na estrela, mas ainda não está na Terra. Tem de estar em alguma parte, sustentada, por assim dizer em algum suporte material.

(Poincaré, no discurso inaugural do congresso de Paris em 1900)



http://pt.wikipedia.org/wiki/Henri_Poincar%C3%A9

Henri Poincaré (1854-1912)

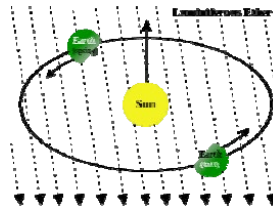
Quer dizer, seria no "éter" que ocorreriam as vibrações que nós designamos por luz ou radiação eletromagnética. A radiação electromagnética propagar-se-ia no éter.

4

À procura do éter ...

Ao admitir a existência do éter disseminado pelo Universo como suporte da luz, os físicos também teriam um suporte para os referenciais em repouso absoluto.

O movimento da Terra (ou outro corpo) em relação ao éter seria um movimento absoluto.



5

À procura do éter ...

Inúmeras experiências foram realizadas para confirmar a existência do éter.



A experiência mais conhecida foi realizada por Michelson e Morley, em 1887.

O dispositivo (interferômetro) que construíram pretendia determinar a velocidade da Terra em relação ao éter, utilizando sinais luminosos (na Terra), de acordo com a regra da adição de velocidades de Galileu.

6

À procura do éter ...

Admitindo que:

- a luz tem uma velocidade constante¹ relativamente ao referencial absoluto do éter, c , de 300 000 km/s;
- a Terra move-se através desse referencial absoluto, com uma velocidade, v , de 30 km/s.

¹ As velocidades da luz e da Terra já tinham sido determinadas experimentalmente.

7

À procura do éter ...

Admitindo que:

- a luz tem uma velocidade constante¹ relativamente ao referencial absoluto do éter, c , de 300 000 km/s;
- a Terra move-se através desse referencial absoluto, com uma velocidade, v , de 30 km/s.

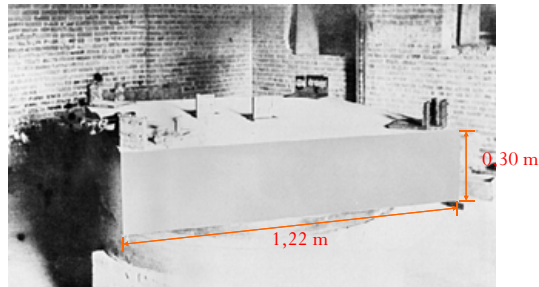
Então, com base na adição das velocidades, seria possível detetar experimentalmente diferenças de velocidade de luz medidas na Terra consoante a direção² em que esta se propagasse.

¹ As velocidades da luz e da Terra já tinham sido determinadas experimentalmente.

² De acordo com a nomenclatura internacional.

8

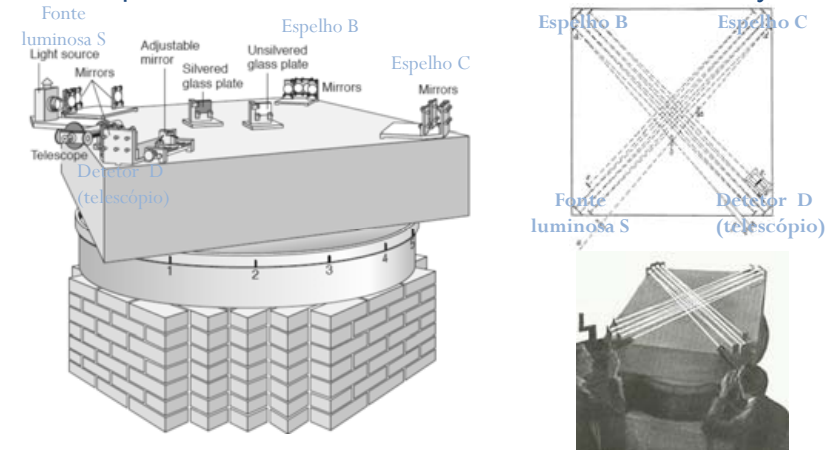
Interferómetro de Michelson-Morley



O aparelho construído por Michelson e por Morley foi colocado numa sala fechada, sobre um bloco de arenito com 0,30 m de espessura e 1,50 m² de área que flutuava numa calha anelar de mercúrio. Assim, pretendiam reduzir ao máximo os efeitos térmicos e vibracionais na recolha dos valores experimentais.

9

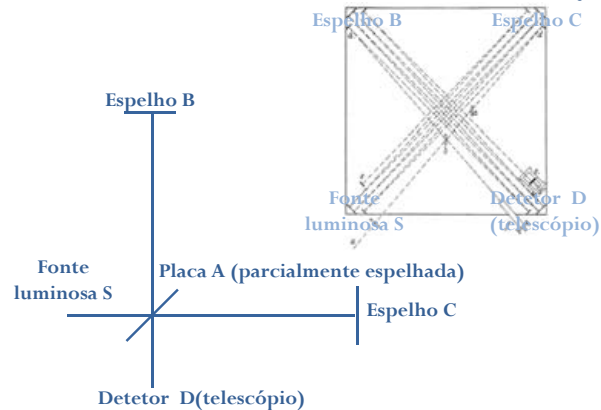
Esquema do Interferómetro de Michelson-Morley



O aparelho foi concebido de forma a que a luz sofresse sucessivas reflexões entre espelhos de cada braço (1 m) para percorrer um trajeto de 11 m e pudesse facilmente rodar sobre o mercúrio, permitindo muitas leituras.

10

Esquema Simplificado do Interferómetro de Michelson-Morley



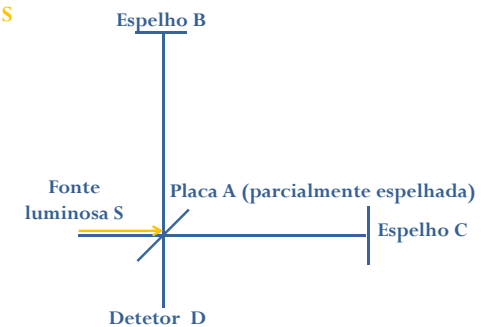
Durante uma rotação completa do aparelho, cada braço ficaria 2 vezes em posição paralela e em posição perpendicular ao éter.

Apesar do comprimento do braço ser de 1 m vamos considerar $L = 11 \text{ m}$, correspondendo à distância que a luz percorre em cada braço após múltiplas reflexões.

11

Esquema Simplificado do Interferómetro de Michelson-Morley

É emitido um feixe de luz pela fonte S



12

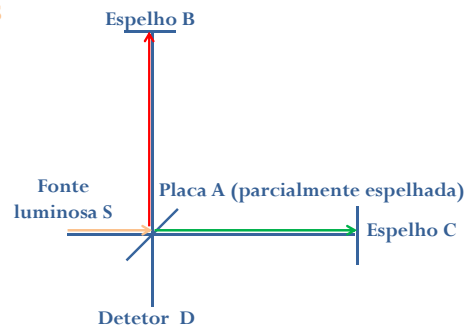
Esquema Simplificado do Interferômetro de Michelson-Morley

É emitido um feixe de luz pela fonte S

Ao chegar à placa A

- parte do feixe é refletido para o espelho B.

- parte do feixe é transmitido para o espelho C.



13

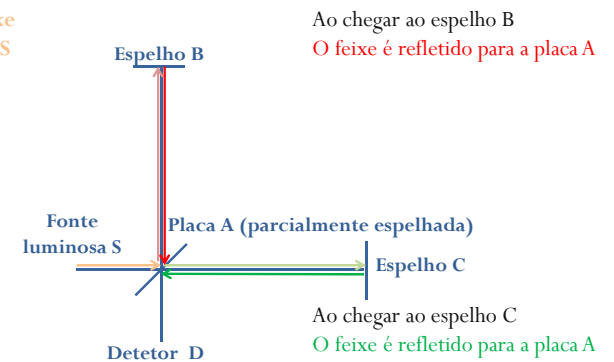
Esquema Simplificado do Interferômetro de Michelson-Morley

É emitido um feixe de luz pela fonte S

Ao chegar à placa A

- parte do feixe é refletido para o espelho B.

- parte do feixe é transmitido para o espelho C.



14

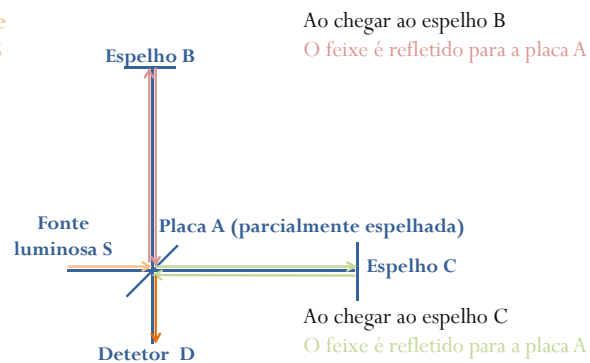
Esquema Simplificado do Interferômetro de Michelson-Morley

É emitido um feixe de luz pela fonte S

Ao chegar à placa A

- parte do feixe é refletido para o espelho B.

- parte do feixe é transmitido para o espelho C.



Os feixes ao chegarem à placa A são novamente transmitidos ou refletidos e recombinaados.

15

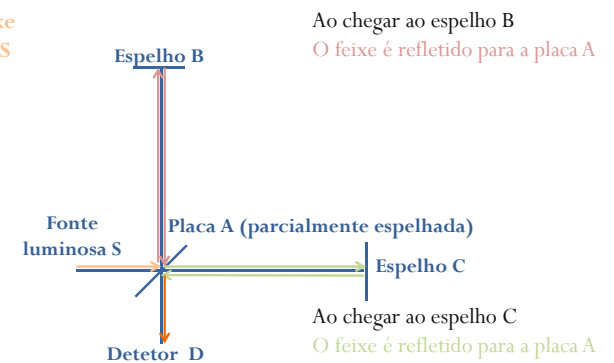
Esquema Simplificado do Interferômetro de Michelson-Morley

É emitido um feixe de luz pela fonte S

Ao chegar à placa A

- parte do feixe é refletido para o espelho B.

- parte do feixe é transmitido para o espelho C.



Os feixes ao chegarem à placa A são novamente transmitidos ou refletidos e recombinaados.

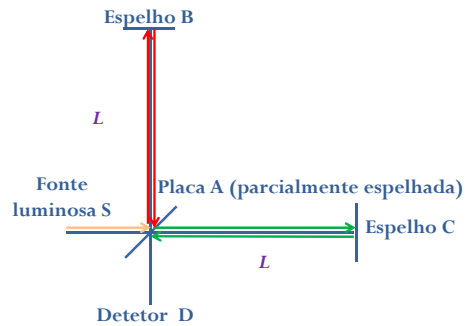
16

Se os dois feixes estiverem em fase (interferência construtiva), reforçam-se, mas se diferirem ligeiramente (intervalos de tempo diferentes) existe interferência parcial que é possível detectar no detetor D.



Se o Interferômetro estiver em repouso ...

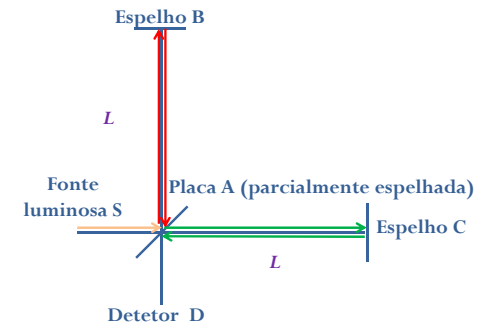
Quanto tempo demoram os feixes de luz a percorrerem os trajetos ABA e ACA?



17

Se o Interferômetro estiver em repouso ...

Quanto tempo demoram os feixes de luz a percorrerem os trajetos ABA e ACA?



Para calcular o tempo que demoram os feixes de luz a percorrer uma distância, precisa de lembrar-se que:

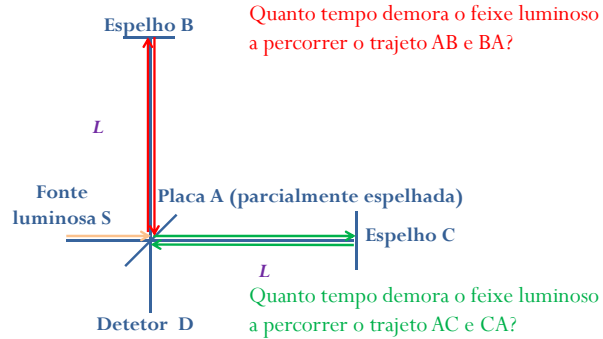
$$\text{velocidade} = \frac{\text{distância percorrida}}{\text{tempo decorrido}}$$

18

Se o Interferômetro estiver em repouso ...

c é a velocidade do feixe luminoso
 $c = 300\,000 \text{ km/s}$

L é a distância de AB ou AC
 $L = 11 \text{ m}$

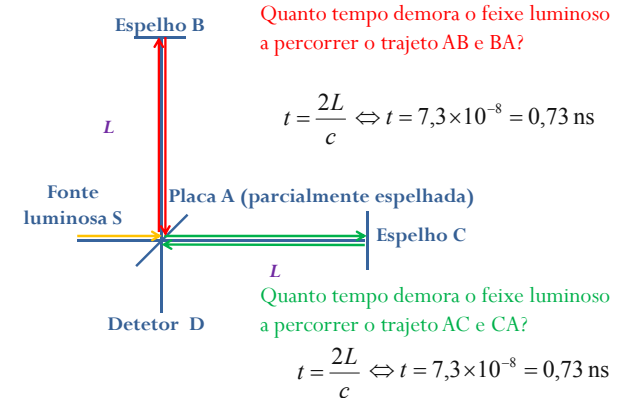


19

Se o Interferômetro estiver em repouso ...

c é a velocidade do feixe luminoso
 $c = 300\,000 \text{ km/s}$

L é a distância de AB ou AC
 $L = 11 \text{ m}$

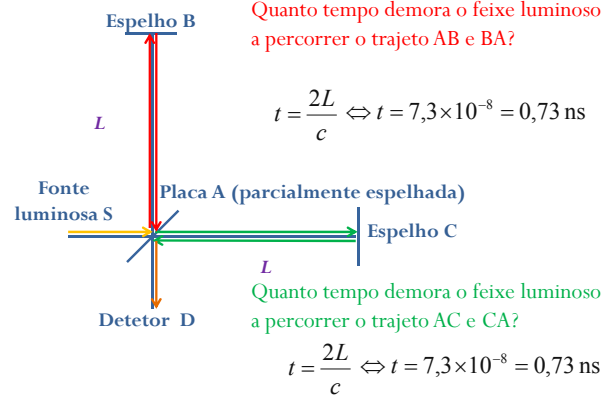


20

Se o Interferómetro estiver em repouso ...

c é a velocidade do feixe luminoso
 $c = 300\,000\text{ km/s}$

L é a distância de AB ou AC
 $L = 11\text{ m}$



Os dois feixes ao recombinarem-se na placa A, como estão em fase reforçam-se (tempos iguais).

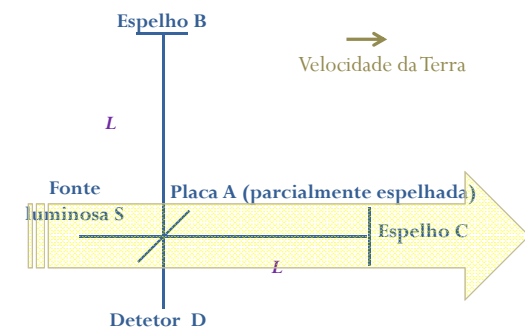
21

Se o Interferómetro estiver em movimento ...

c é a velocidade do feixe luminoso
 $c = 300\,000\text{ km/s}$

L é a distância de AB ou AC
 $L = 11\text{ m}$

v é a velocidade da Terra na sua órbita
 $v = 30\text{ km/s}$



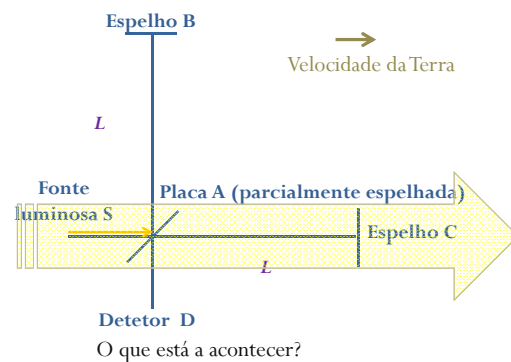
22

Se o Interferómetro estiver em movimento ...

c é a velocidade do feixe luminoso
 $c = 300\,000\text{ km/s}$

L é a distância de AB ou AC
 $L = 11\text{ m}$

v é a velocidade da Terra na sua órbita
 $v = 30\text{ km/s}$



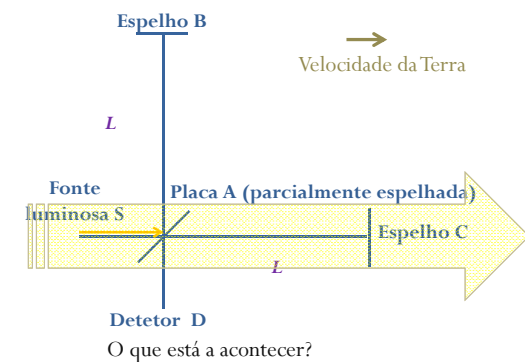
23

Se o Interferómetro estiver em movimento ...

c é a velocidade do feixe luminoso
 $c = 300\,000\text{ km/s}$

L é a distância de AB ou AC
 $L = 11\text{ m}$

v é a velocidade da Terra na sua órbita
 $v = 30\text{ km/s}$



- O interferómetro está a mover-se para a direita, com a Terra.
- A fonte luminosa emite um feixe luminoso que atinge a placa A.

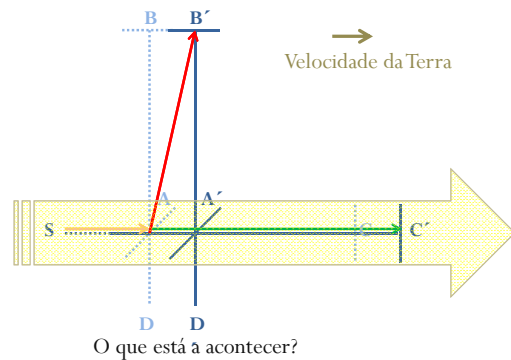
24

Se o Interferômetro estiver em movimento ...

c é a velocidade do feixe luminoso
 $c = 300\,000\text{ km/s}$

L é a distância de AB ou AC
 $L = 11\text{ m}$

v é a velocidade da Terra na sua órbita
 $v = 30\text{ km/s}$



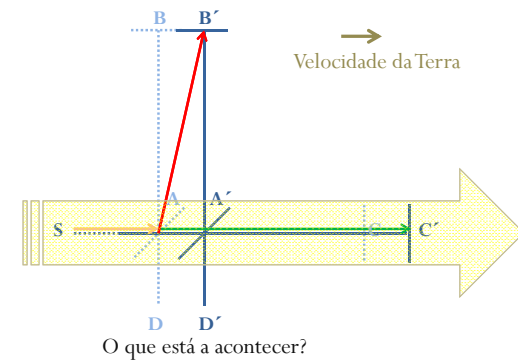
25

Se o Interferômetro estiver em movimento ...

c é a velocidade do feixe luminoso
 $c = 300\,000\text{ km/s}$

L é a distância de AB ou AC
 $L = 11\text{ m}$

v é a velocidade da Terra na sua órbita
 $v = 30\text{ km/s}$



- O interferómetro está a mover-se para a direita, com a Terra.
- Na placa A o feixe luminoso divide-se em dois feixes:
 - A parte do feixe luminoso que é reflectido pela placa A, atinge o espelho B.
 - A parte do feixe luminoso que é transmitido pela placa A, atinge o espelho C.

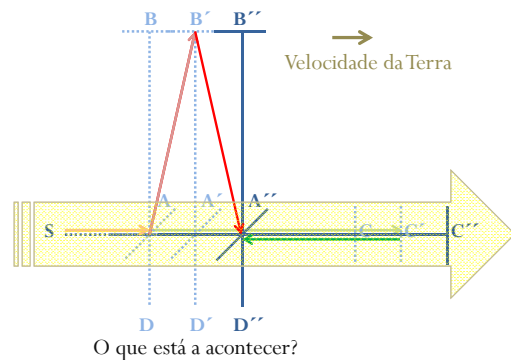
26

Se o Interferômetro estiver em movimento ...

c é a velocidade do feixe luminoso
 $c = 300\,000\text{ km/s}$

L é a distância de AB ou AC
 $L = 11\text{ m}$

v é a velocidade da Terra na sua órbita
 $v = 30\text{ km/s}$



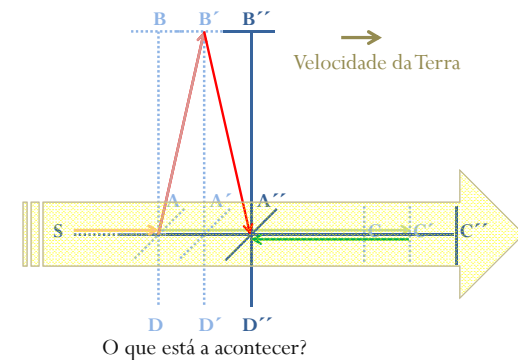
27

Se o Interferômetro estiver em movimento ...

c é a velocidade do feixe luminoso
 $c = 300\,000\text{ km/s}$

L é a distância de AB ou AC
 $L = 11\text{ m}$

v é a velocidade da Terra na sua órbita
 $v = 30\text{ km/s}$



- O interferómetro está a mover-se para a direita, com a Terra.
- No espelho B, o feixe luminoso é reflectido e atinge a placa A.
- No espelho C, o feixe luminoso é reflectido e atinge a placa A.

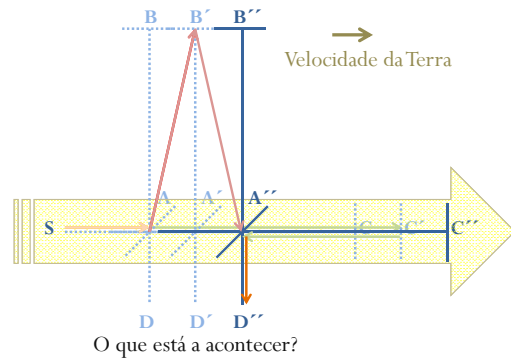
28

Se o Interferômetro estiver em movimento ...

c é a velocidade do feixe luminoso
 $c = 300\,000\text{ km/s}$

L é a distância de AB ou AC
 $L = 11\text{ m}$

v é a velocidade da Terra na sua órbita
 $v = 30\text{ km/s}$



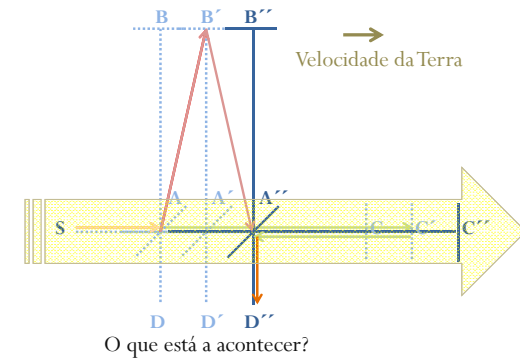
29

Se o Interferômetro estiver em movimento ...

c é a velocidade do feixe luminoso
 $c = 300\,000\text{ km/s}$

L é a distância de AB ou AC
 $L = 11\text{ m}$

v é a velocidade da Terra na sua órbita
 $v = 30\text{ km/s}$



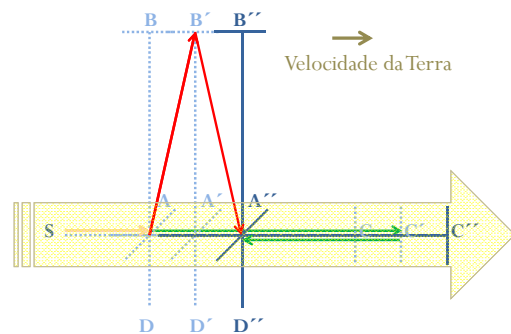
O que está a acontecer?

- O interferômetro está a mover-se para a direita, com a Terra.
- Na placa A os dois feixes, são novamente transmitidos ou refletidos e recombinados.
- O feixe luminoso, recombinado, atinge o detetor.

30

Se o Interferômetro estiver em movimento ...

- Quais são as distâncias percorridas pelos feixes de luz nos trajetos AB'A'' e AC'A''?
- Quanto tempo demoram os feixes de luz a percorrer os trajetos AB'A'' e AC'A''?



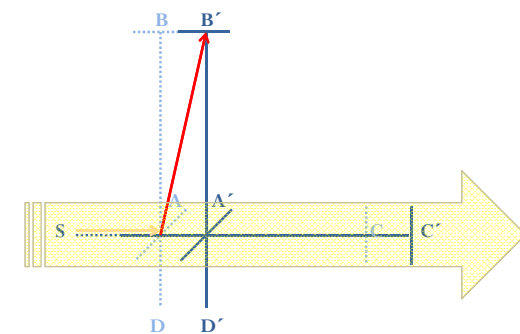
Para calcular as distâncias percorridas pelos feixes de luz e os respetivos tempos que demoram a percorrer essas distâncias, precisa de lembrar-se que:

$$\text{velocidade} = \frac{\text{distância percorrida}}{\text{tempo decorrido}}$$

31

Se o Interferômetro estiver em movimento ...

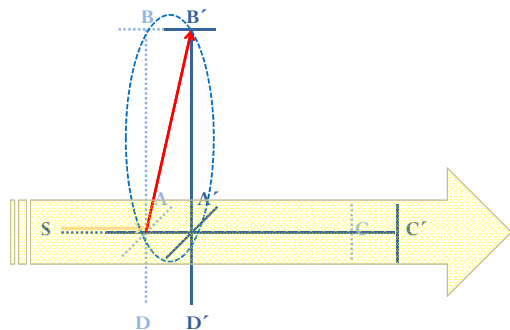
Qual é a distância que o feixe percorre de A a B'?



32

Se o Interferômetro estiver em movimento ...

Qual é a distância que o feixe percorre de A a B'?



33

Se o Interferômetro estiver em movimento ...

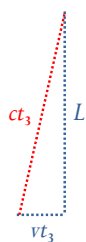
Qual é a distância que o feixe percorre de A a B'?



34

Se o Interferômetro estiver em movimento ...

Qual é a distância que o feixe percorre de A a B'?

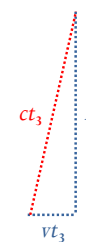


35

Se o Interferômetro estiver em movimento ...

Qual é a distância que o feixe percorre de A a B'?

$$(ct_3)^2 = L^2 + (vt_3)^2$$

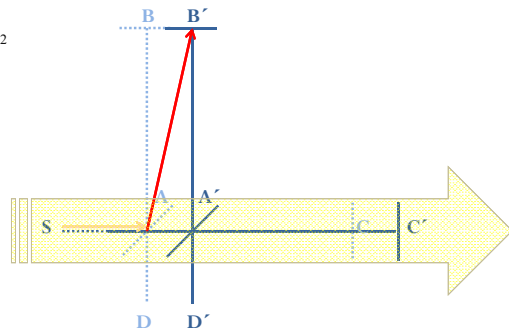


36

Se o Interferômetro estiver em movimento ...

Qual é a distância que o feixe percorre de A a B'?

$$(ct_3)^2 = L^2 + (vt_3)^2$$



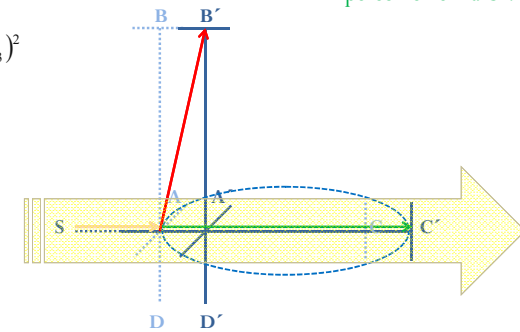
37

Se o Interferômetro estiver em movimento ...

Qual é a distância que o feixe percorre de A a B'?

$$(ct_3)^2 = L^2 + (vt_3)^2$$

Qual é a distância que o feixe percorre de A a C'?



38

Se o Interferômetro estiver em movimento ...

Qual é a distância que o feixe percorre de A a B'?

$$(ct_3)^2 = L^2 + (vt_3)^2$$

Qual é a distância que o feixe percorre de A a C'?



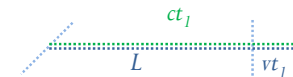
39

Se o Interferômetro estiver em movimento ...

Qual é a distância que o feixe percorre de A a B'?

$$(ct_3)^2 = L^2 + (vt_3)^2$$

Qual é a distância que o feixe percorre de A a C'?



40

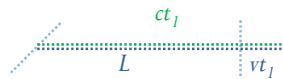
Se o Interferômetro estiver em movimento ...

Qual é a distância que o feixe percorre de A a B'?

$$(ct_3)^2 = L^2 + (vt_1)^2$$

Qual é a distância que o feixe percorre de A a C'?

$$ct_1 = L + vt_1$$



41

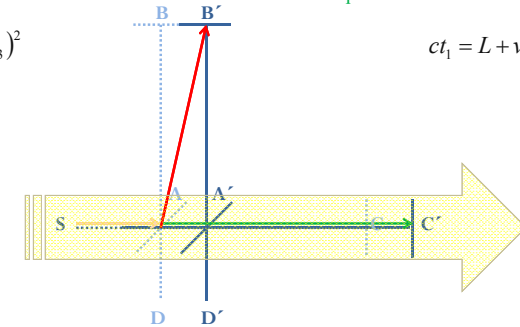
Se o Interferômetro estiver em movimento ...

Qual é a distância que o feixe percorre de A a B'?

$$(ct_3)^2 = L^2 + (vt_3)^2$$

Qual é a distância que o feixe percorre de A a C'?

$$ct_1 = L + vt_1$$



42

Se o Interferômetro estiver em movimento ...

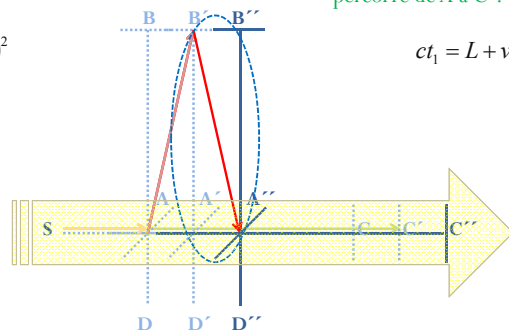
Qual é a distância que o feixe percorre de A a B'?

$$(ct_3)^2 = L^2 + (vt_3)^2$$

E de B' a A''?

Qual é a distância que o feixe percorre de A a C'?

$$ct_1 = L + vt_1$$



43

Se o Interferômetro estiver em movimento ...

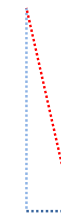
Qual é a distância que o feixe percorre de A a B'?

$$(ct_3)^2 = L^2 + (vt_3)^2$$

E de B' a A''?

Qual é a distância que o feixe percorre de A a C'?

$$ct_1 = L + vt_1$$



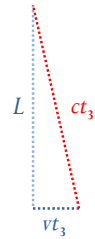
44

Se o Interferômetro estiver em movimento ...

Qual é a distância que o feixe percorre de A a B'?

$$(ct_3)^2 = L^2 + (vt_3)^2$$

E de B' a A''?



Qual é a distância que o feixe percorre de A a C'?

$$ct_1 = L + vt_1$$

45

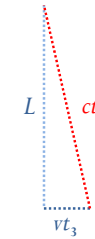
Se o Interferômetro estiver em movimento ...

Qual é a distância que o feixe percorre de A a B'?

$$(ct_3)^2 = L^2 + (vt_3)^2$$

E de B' a A''?

$$(ct_3)^2 = L^2 + (vt_3)^2$$



Qual é a distância que o feixe percorre de A a C'?

$$ct_1 = L + vt_1$$

46

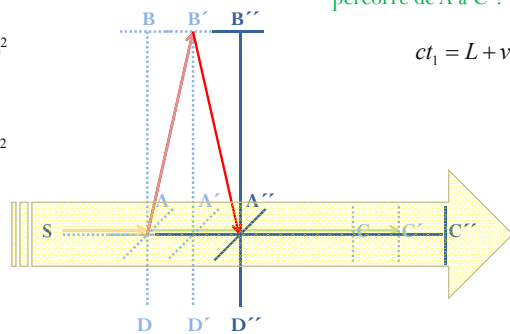
Se o Interferômetro estiver em movimento ...

Qual é a distância que o feixe percorre de A a B'?

$$(ct_3)^2 = L^2 + (vt_3)^2$$

E de B' a A''?

$$(ct_3)^2 = L^2 + (vt_3)^2$$



Qual é a distância que o feixe percorre de A a C'?

$$ct_1 = L + vt_1$$

47

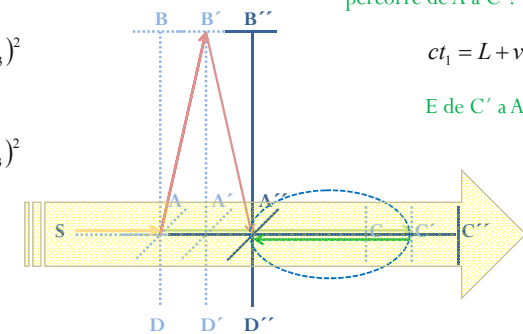
Se o Interferômetro estiver em movimento ...

Qual é a distância que o feixe percorre de A a B'?

$$(ct_3)^2 = L^2 + (vt_3)^2$$

E de B' a A''?

$$(ct_3)^2 = L^2 + (vt_3)^2$$



Qual é a distância que o feixe percorre de A a C'?

$$ct_1 = L + vt_1$$

E de C' a A''?

48

Se o Interferômetro estiver em movimento ...

Qual é a distância que o feixe percorre de A a B'?

$$(ct_3)^2 = L^2 + (vt_3)^2$$

E de B' a A''?

$$(ct_3)^2 = L^2 + (vt_3)^2$$

Qual é a distância que o feixe percorre de A a C'?

$$ct_1 = L + vt_1$$

E de C' a A''?



49

Se o Interferômetro estiver em movimento ...

Qual é a distância que o feixe percorre de A a B'?

$$(ct_3)^2 = L^2 + (vt_3)^2$$

E de B' a A''?

$$(ct_3)^2 = L^2 + (vt_3)^2$$

Qual é a distância que o feixe percorre de A a C'?

$$ct_1 = L + vt_1$$

E de C' a A''?



50

Se o Interferômetro estiver em movimento ...

Qual é a distância que o feixe percorre de A a B'?

$$(ct_3)^2 = L^2 + (vt_3)^2$$

E de B' a A''?

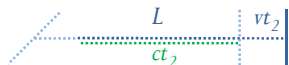
$$(ct_3)^2 = L^2 + (vt_3)^2$$

Qual é a distância que o feixe percorre de A a C'?

$$ct_1 = L + vt_1$$

E de C' a A''?

$$ct_2 = L - vt_2$$



51

Se o Interferômetro estiver em movimento ...

Qual é a distância que o feixe percorre de A a B'?

$$(ct_3)^2 = L^2 + (vt_3)^2$$

E de B' a A''?

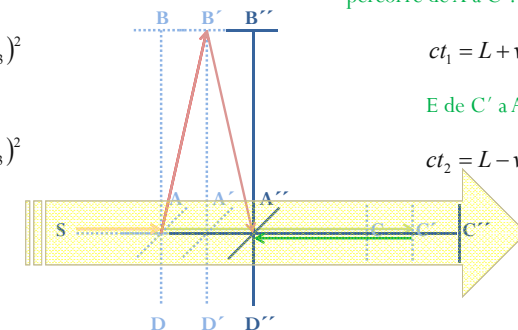
$$(ct_3)^2 = L^2 + (vt_3)^2$$

Qual é a distância que o feixe percorre de A a C'?

$$ct_1 = L + vt_1$$

E de C' a A''?

$$ct_2 = L - vt_2$$



52

Se o Interferômetro estiver em movimento ...

Qual é a distância que o feixe percorre de A a B'?

$$(ct_3)^2 = L^2 + (vt_3)^2$$

E de B' a A''?

$$(ct_3)^2 = L^2 + (vt_3)^2$$

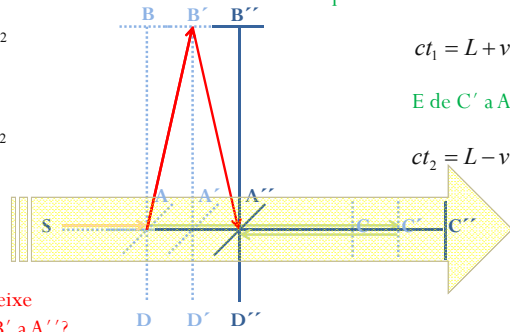
Qual é o tempo que o feixe demora de A a B' e de B' a A''?

Qual é a distância que o feixe percorre de A a C'?

$$ct_1 = L + vt_1$$

E de C' a A''?

$$ct_2 = L - vt_2$$



53

Se o Interferômetro estiver em movimento ...

Qual é a distância que o feixe percorre de A a B'?

$$(ct_3)^2 = L^2 + (vt_3)^2$$

E de B' a A''?

$$(ct_3)^2 = L^2 + (vt_3)^2$$

Qual é o tempo que o feixe demora de A a B' e de B' a A''?

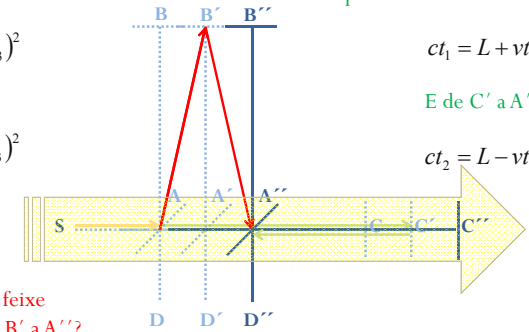
$$t_3 = \frac{2L}{\sqrt{c^2 - u^2}} = \frac{2L}{c\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Qual é a distância que o feixe percorre de A a C'?

$$ct_1 = L + vt_1$$

E de C' a A''?

$$ct_2 = L - vt_2$$



54

Se o Interferômetro estiver em movimento ...

Qual é a distância que o feixe percorre de A a B'?

$$(ct_3)^2 = L^2 + (vt_3)^2$$

E de B' a A''?

$$(ct_3)^2 = L^2 + (vt_3)^2$$

Qual é o tempo que o feixe demora de A a B' e de B' a A''?

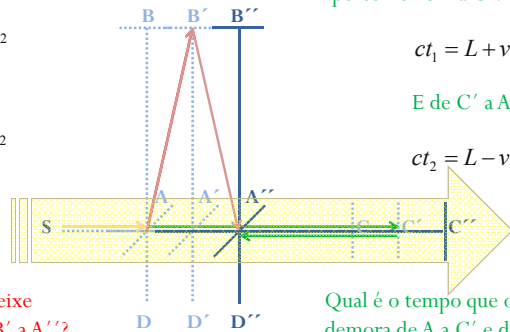
$$t_3 = \frac{2L}{\sqrt{c^2 - u^2}} = \frac{2L}{c\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Qual é a distância que o feixe percorre de A a C'?

$$ct_1 = L + vt_1$$

E de C' a A''?

$$ct_2 = L - vt_2$$



Qual é o tempo que o feixe demora de A a C' e de C' a A''?

55

Se o Interferômetro estiver em movimento ...

Qual é a distância que o feixe percorre de A a B'?

$$(ct_3)^2 = L^2 + (vt_3)^2$$

E de B' a A''?

$$(ct_3)^2 = L^2 + (vt_3)^2$$

Qual é o tempo que o feixe demora de A a B' e de B' a A''?

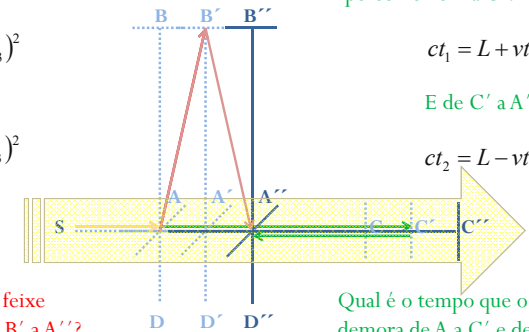
$$t_3 = \frac{2L}{\sqrt{c^2 - u^2}} = \frac{2L}{c\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Qual é a distância que o feixe percorre de A a C'?

$$ct_1 = L + vt_1$$

E de C' a A''?

$$ct_2 = L - vt_2$$

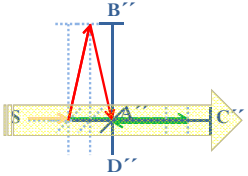


Qual é o tempo que o feixe demora de A a C' e de C' a A''?

$$t_1 + t_2 = \frac{L}{c-v} + \frac{L}{c+v} = \frac{2L}{c\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}$$

56

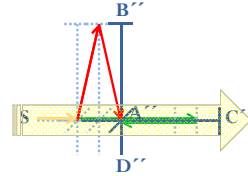
Existe uma diferença entre o tempo que o feixe leva a percorrer o trajeto AB'A'' e o trajeto AC'A''. Qual é?

$$t_3 = \frac{2L}{\sqrt{c^2 - u^2}} = \frac{2L}{c\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$


$$t_1 + t_2 = \frac{L}{c-v} + \frac{L}{c+v} = \frac{2L}{c\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}$$

57

Existe uma diferença entre o tempo que o feixe leva a percorrer o trajeto AB'A'' e o trajeto AC'A''. Qual é?

$$t_3 = \frac{2L}{\sqrt{c^2 - u^2}} = \frac{2L}{c\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$


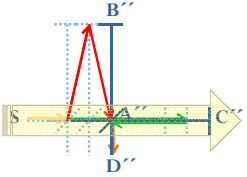
$$t_1 + t_2 = \frac{L}{c-v} + \frac{L}{c+v} = \frac{2L}{c\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}$$

$$\Delta t = \frac{2L}{c} \left(\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right) \Leftrightarrow \Delta t = \frac{2 \times 11}{3 \times 10^8} \left(\frac{1}{1 - \frac{(3 \times 10^4)^2}{(3 \times 10^8)^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(3 \times 10^4)^2}{(3 \times 10^8)^2}}} \right) = 3 \times 10^{-16} \text{ s}$$

A diferença de tempo entre os dois feixes é de $3 \times 10^{-16} \text{ s}$.

58

Existe uma diferença entre o tempo que o feixe leva a percorrer o trajeto AB'A'' e o trajeto AC'A''. Qual é?

$$t_3 = \frac{2L}{\sqrt{c^2 - u^2}} = \frac{2L}{c\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$


$$t_1 + t_2 = \frac{L}{c-v} + \frac{L}{c+v} = \frac{2L}{c\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}$$

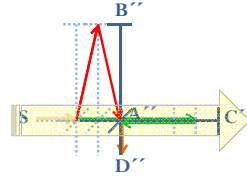
$$\Delta t = \frac{2L}{c} \left(\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right) \Leftrightarrow \Delta t = \frac{2 \times 11}{3 \times 10^8} \left(\frac{1}{1 - \frac{(3 \times 10^4)^2}{(3 \times 10^8)^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(3 \times 10^4)^2}{(3 \times 10^8)^2}}} \right) = 3 \times 10^{-16} \text{ s}$$

A diferença de tempo entre os dois feixes é de $3 \times 10^{-16} \text{ s}$.

Esta diferença de tempo, na recombinação dos dois feixes, deveria ser detetada no detetador D.

59

Existe uma diferença entre o tempo que o feixe leva a percorrer o trajeto AB'A'' e o trajeto AC'A''. Qual é?

$$t_3 = \frac{2L}{\sqrt{c^2 - u^2}} = \frac{2L}{c\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$


$$t_1 + t_2 = \frac{L}{c-v} + \frac{L}{c+v} = \frac{2L}{c\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}$$

$$\Delta t = \frac{2L}{c} \left(\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right) \Leftrightarrow \Delta t = \frac{2 \times 11}{3 \times 10^8} \left(\frac{1}{1 - \frac{(3 \times 10^4)^2}{(3 \times 10^8)^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(3 \times 10^4)^2}{(3 \times 10^8)^2}}} \right) = 3 \times 10^{-16} \text{ s}$$

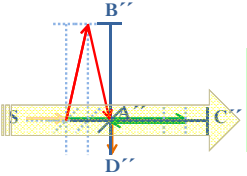
A diferença de tempo entre os dois feixes é de $3 \times 10^{-16} \text{ s}$.

Esta diferença de tempo, na recombinação dos dois feixes, deveria ser detetada no detetador D.

Mas tal não aconteceu.

60

Existe uma diferença entre o tempo que o feixe leva a percorrer o trajeto AB'A'' e o trajeto AC'A''. Qual é?

$$t_3 = \frac{2L}{\sqrt{c^2 - u^2}} = \frac{2L}{c\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$


$$t_1 + t_2 = \frac{L}{c-v} + \frac{L}{c+v} = \frac{2L}{c\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}$$

$$\Delta t = \frac{2L}{c} \left(\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right) \Leftrightarrow \Delta t = \frac{2 \times 11}{3 \times 10^8} \left(\frac{1}{1 - \frac{(3 \times 10^4)^2}{(3 \times 10^8)^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(3 \times 10^4)^2}{(3 \times 10^8)^2}}} \right) = 3 \times 10^{-16} s$$

A diferença de tempo entre os dois feixes é de $3 \times 10^{-16} s$.

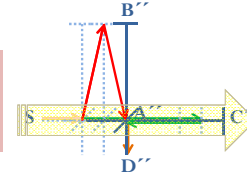
Esta diferença de tempo, na recominação dos dois feixes, deveria ser detetada no detetor D.

Mas tal não aconteceu.

O aparelho foi rodado de 90° , para anular variações devido a diferenças no tamanho dos 2 braços.

61

Existe uma diferença entre o tempo que o feixe leva a percorrer o trajeto AB'A'' e o trajeto AC'A''. Qual é?

$$t_3 = \frac{2L}{\sqrt{c^2 - u^2}} = \frac{2L}{c\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$


$$t_1 + t_2 = \frac{L}{c-v} + \frac{L}{c+v} = \frac{2L}{c\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}$$

$$\Delta t = \frac{2L}{c} \left(\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right) \Leftrightarrow \Delta t = \frac{2 \times 11}{3 \times 10^8} \left(\frac{1}{1 - \frac{(3 \times 10^4)^2}{(3 \times 10^8)^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(3 \times 10^4)^2}{(3 \times 10^8)^2}}} \right) = 3 \times 10^{-16} s$$

A diferença de tempo entre os dois feixes é de $3 \times 10^{-16} s$.

Esta diferença de tempo, na recominação dos dois feixes, deveria ser detetada no detetor D.

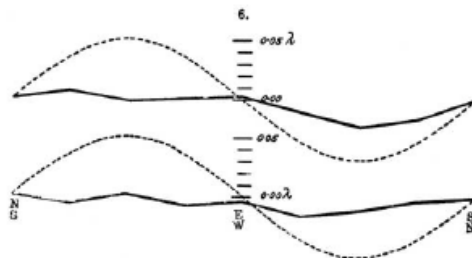
Mas tal não aconteceu.

O aparelho foi rodado de 90° , para anular variações devido a diferenças no tamanho dos 2 braços. **Mas nenhuma alteração nas franjas de interferência foi detetada pelo detetor D.**

62

Os resultados da experiência de Michelson-Morley?

The results of the observations are expressed graphically in fig. 6. The upper is the curve for the observations at noon, and the lower that for the evening observations. The dotted curves represent *one-eighth* of the theoretical displacements. It seems fair to conclude from the figure that if there is any displacement due to the relative motion of the earth and the luminiferous ether, this cannot be much greater than 0.01 of the distance between the fringes.



placement due to the relative motion of the earth and the luminiferous ether, this cannot be much greater than 0.01 of the distance between the fringes.

(Michelson & Morley, 1887)

63

Os resultados da experiência de Michelson-Morley?

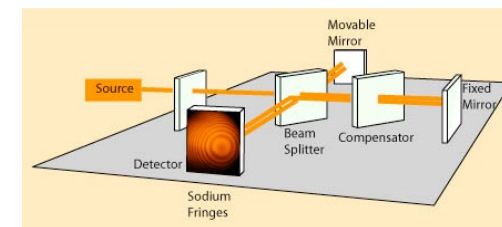


Imagem exemplificativa das bandas de interferência brilhantes alternadas de escuras.

64

Os resultados da experiência de Michelson-Morley?

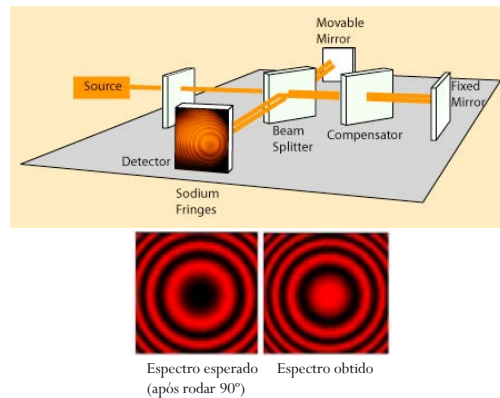


Imagem exemplificativa das bandas de interferência brilhantes alternadas de escuras. Ao rodar 90° previa-se uma desfasagem do padrão, encontrando o centro escuro (interferência destrutiva), ou seja, as zonas iluminadas passariam a ficar escuras e vice-versa. Mas não foram encontradas alterações na franja padrão.

65

A explicação de ...

66

A explicação de ...

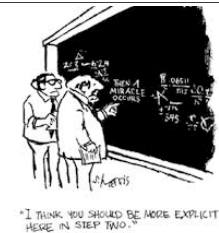
O que significa explicar?



67

A explicação de ...

O que significa explicar?



“Para um físico, um determinado acontecimento está "explicado" no momento em que fica demonstrado que é uma consequência lógica de uma lei em que há razão para acreditar. Por outras palavras, um físico que acredita numa lei geral "explica" uma observação mostrando que ela é consistente com essa lei. De certa maneira, o trabalho do físico é mostrar que o universo infinito de ocorrências separadas, aparentemente distintas, que se podem observar é constituído apenas por manifestações ou consequências distintas das mesmas regras gerais, que descrevem a maneira como "funciona" o mundo.”

(Holton, Rutherford & Watson, 1978)

68

A explicação de Lorentz

Lorentz colocou a hipótese dos corpos em movimento se contraírem na direção do movimento³.

Se o comprimento de um objeto em repouso é L_0 , quando ele se move com velocidade v será L_1 na direção do movimento e dado pela expressão

$$L_1 = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$



http://pt.wikipedia.org/wiki/Hendrik_Lorentz

Hendrik Lorentz (1853-1928)

³George Fitzgerald foi o primeiro a colocar a hipótese de que *o comprimento dos corpos materiais se modifica, segundo se movam ao longo do éter*. Lorentz também chegou à mesma ideia de forma independente pelo que a expressão acima é conhecida por *contração de Fitzgerald-Lorentz* (Pais, 1982/2004)

69

A explicação de Lorentz

Qual é a alteração que a expressão de Lorentz introduz no interferômetro de Michelson- Morley?



70

A explicação de Lorentz

Qual é a alteração que a expressão de Lorentz introduz no interferômetro de Michelson- Morley?

Aplicando a expressão $L_1 = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ à distância AC'

A expressão $t_1 + t_2 = \frac{2L}{c \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}$

É alterada para $t_1 + t_2 = \frac{2L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{c \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} = \frac{2L_0}{c \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$

71

A explicação de Lorentz

Qual é a alteração que a expressão de Lorentz introduz no interferômetro de Michelson- Morley?

Aplicando a expressão $L_1 = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ à distância AC'

A expressão $t_1 + t_2 = \frac{2L}{c \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}$

É alterada para $t_1 + t_2 = \frac{2L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{c \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} = \frac{2L_0}{c \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$

Ou seja, a luz percorre os trajetos $AC'A''$ e $AB'A''$, no mesmo tempo.

72

A explicação de Lorentz

Se o dispositivo encolher na direção do movimento ($AC'A''$), comparando os tempos que demora a luz a percorrer os trajetos $AB'A''$ e $AC'A''$ temos uma explicação para a experiência de Michelson-Morley ter falhado.

73

A explicação de Einstein

A contração dos corpos na direção do movimento, aparece como uma consequência necessária dos dois postulados propostos por Einstein e nos quais, se baseia a Teoria da Relatividade Restrita⁴ (TRR).



http://en.wikipedia.org/wiki/Albert_Einstein
Albert Einstein (1879-1955)

⁴A teoria da relatividade restrita é aplicada apenas a **referenciais inerciais** – referenciais em que as Leis de Newton são válidas (referenciais que se movem com velocidade relativa constante, não podem sofrer acelerações relativas).

74

A explicação de Einstein - TRR

No artigo “Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento”, publicado em 1905, Einstein propõe 2 postulados:

-Princípio da relatividade

As leis da física são as mesmas em todos os referenciais inerciais. Não existe um referencial absoluto.

-Princípio da constância da velocidade da luz

O módulo da velocidade da luz no vácuo tem o mesmo valor c em todas as direções e em todos os referenciais inerciais.



http://en.wikipedia.org/wiki/Albert_Einstein
Albert Einstein (1879-1955)

75

A explicação de Einstein - TRR

Com estes dois postulados, Einstein:

- Amplia o postulado da relatividade de Galileu, incluindo não só as leis da mecânica, mas também as do eletromagnetismo.
- Resolve o problema da incompatibilidade da eletrodinâmica de Maxwell-Lorentz com a mecânica clássica (regra da adição das velocidades de Galileu).

76

Consequências da TRR

- A dilatação do tempo.
- A contração do espaço.
- Os acontecimentos são estudados tendo em conta 4 dimensões (x, y, z, t) .
- A velocidade limite, c .
- A necessidade da existência do *éter* desaparece.

Abordagem da Simultaneidade (1)

Teoria da Relatividade Restrita

Simultaneidade de Acontecimentos 1



Pessoa a andar de bicicleta (20 km/h)



Bola de ténis pode atingir uma velocidade de 240 km/h



O Falcon HTV-2 pode voar com uma velocidade de 20 920 km/h

2

Exemplos	Velocidade (km/h)	Comparação com a velocidade da luz	
Pessoa a caminhar	5	0.0000000046	Bilionésima parte de c
Pessoa a andar de bicicleta	20	0.000000019	Centésima de milionésima parte de c
Velocidade máxima de uma chita	120	0.00000011	Décima de milionésima parte de c
Velocidade máxima Alfa Pendular	220	0.00000020	idem
Velocidade máxima Bugatti Veyron	434	0.00000040	idem
Velocidade máxima TGV	574.8	0.00000053	idem
Velocidade som	1 200	0.0000011	Milionésima parte de c
Velocidade máxima Concorde	2 346	0.0000021	Milionésima parte de c
Boeing X-43	12 000	0.000011	Centésima de milésima parte de c
Velocidade de reentrada do vaivém espacial	26 000	0.000024	idem
Velocidade de uma nave não tripulada	250 000	0.00023	Décima de milésima parte de c
Velocidade da luz (c)	1 079 252 848,8	-	-

3

“Gedanken” Experiments

As diversas escalas existentes nem sempre permitem medições reais, por isso recorreu-se a *experiências imaginadas*, uma tradição que já vem de Galileu e que Einstein também usou.



Thought experiment

From Wikipedia, the free encyclopedia



This article **possibly contains original research**. Please improve it by **verifying the claims made** and adding **inline citations**. Statements consisting only of **removed**. (March 2018)

A **thought experiment** or **Gedankenexperiment** (from German) considers some **hypothesis, theory**,^[1] or **principle** for the purpose of thinking through its consequences. Given the structure of the experiment, it may or may not be possible to actually perform it, and, in the case that it is possible for it to be performed, there need be no intention of any kind to actually perform the experiment in question. The common goal of a thought experiment is to explore the potential consequences of the principle in question.

Famous examples of thought experiments include **Schrodinger's cat**, illustrating **quantum indeterminacy** through the manipulation of a perfectly sealed environment and a tiny bit of **radioactive substance**, and **Mauw's demon**, which attempts to demonstrate the ability of a hypothetical finite being to violate the **second law of thermodynamics**.

4

Dois acontecimentos simultâneos num referencial inercial, também serão simultâneos em qualquer outro referencial inercial?

5

Referenciais

6

Referenciais

- Um referencial de inércia fixo na Terra.



7

Referenciais

- Um referencial de inércia fixo na Terra.
- Um referencial de inércia fixo numa carruagem que se movimenta relativamente ao solo com velocidade $c/2$.



8

Referenciais

- Um referencial de inércia fixo na Terra.
- Um referencial de inércia fixo numa carruagem que se movimenta relativamente ao solo com velocidade $c/2$.

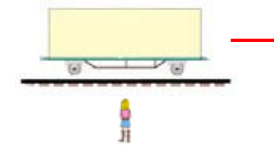


Observadores

9

Referenciais

- Um referencial de inércia fixo na Terra.
- Um referencial de inércia fixo numa carruagem que se movimenta relativamente ao solo com velocidade $c/2$.



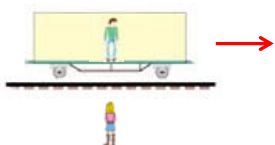
Observadores

- Alice, observadora ligada ao referencial fixo na Terra.

10

Referenciais

- Um referencial de inércia fixo na Terra.
- Um referencial de inércia fixo numa carruagem que se movimenta relativamente ao solo com velocidade $c/2$.



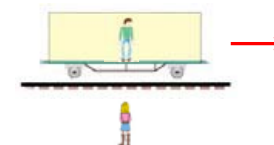
Observadores

- Alice, observadora ligada ao referencial fixo na Terra.
- David, observador ligado ao referencial fixo na carruagem.

11

Referenciais

- Um referencial de inércia fixo na Terra.
- Um referencial de inércia fixo numa carruagem que se movimenta relativamente ao solo com velocidade $c/2$.



Acontecimentos

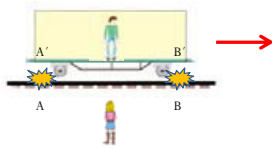
Observadores

- Alice, observadora ligada ao referencial fixo na Terra.
- David, observador ligado ao referencial fixo na carruagem.

12

Referenciais

- Um referencial de inércia fixo na Terra.
- Um referencial de inércia fixo numa carruagem que se movimenta relativamente ao solo com velocidade $c/2$.



Acontecimentos

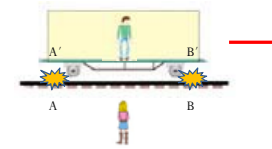
Quando os pontos A e B coincidem com os pontos A' e B', os emissores flash colocados nos pontos A e B do carril emitem 2 sinais luminosos.

Observadores

- Alice, observadora ligada ao referencial fixo na Terra.
- David, observador ligado ao referencial fixo na carruagem.

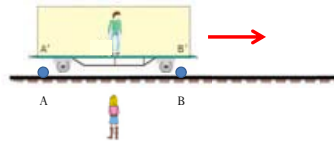
13

O que vê a Alice?



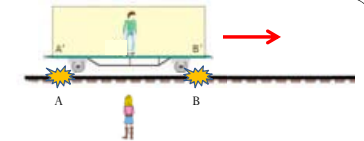
14

Quando os pontos A' e B' coincidem com os pontos A e B são emitidos simultaneamente dois sinais luminosos, em A e em B.



15

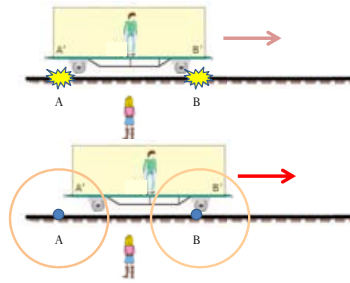
Quando os pontos A' e B' coincidem com os pontos A e B são emitidos simultaneamente dois sinais luminosos, em A e em B.



16

Quando os pontos A' e B' coincidem com os pontos A e B são emitidos simultaneamente dois sinais luminosos, em A e em B .

O que está a acontecer?

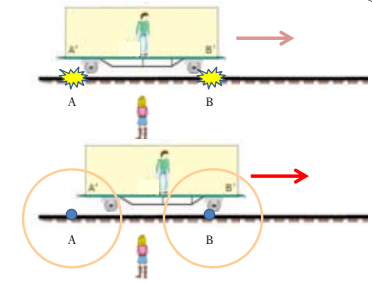


17

Quando os pontos A' e B' coincidem com os pontos A e B são emitidos simultaneamente dois sinais luminosos, em A e em B .

O que está a acontecer?

O sinal luminoso proveniente de B atinge o David.

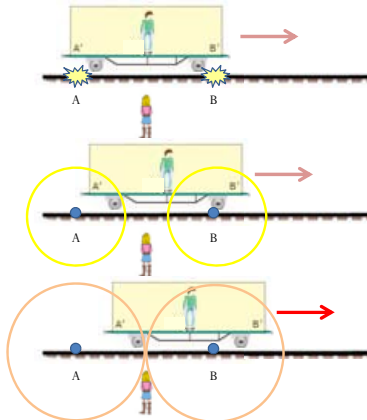


18

Quando os pontos A' e B' coincidem com os pontos A e B são emitidos simultaneamente dois sinais luminosos, em A e em B .

O sinal luminoso proveniente de B atinge o David.

O que está a acontecer?



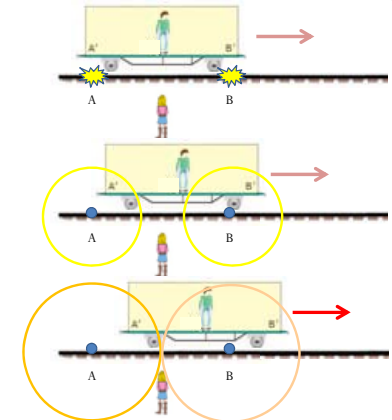
19

Quando os pontos A' e B' coincidem com os pontos A e B são emitidos simultaneamente dois sinais luminosos, em A e em B .

O sinal luminoso proveniente de B atinge o David.

O que está a acontecer?

Os sinais luminosos provenientes de A e B atingem a Alice.



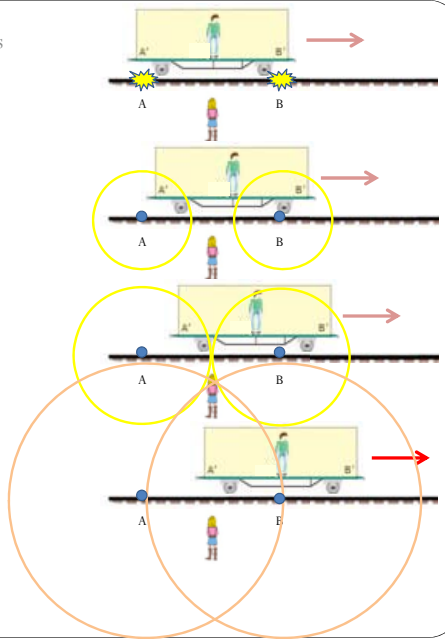
20

Quando os pontos A' e B' coincidem com os pontos A e B são emitidos simultaneamente dois sinais luminosos, em A e em B .

O sinal luminoso proveniente de B atinge o David.

Os sinais luminosos provenientes de A e B atingem a Alice.

O que está a acontecer?



21

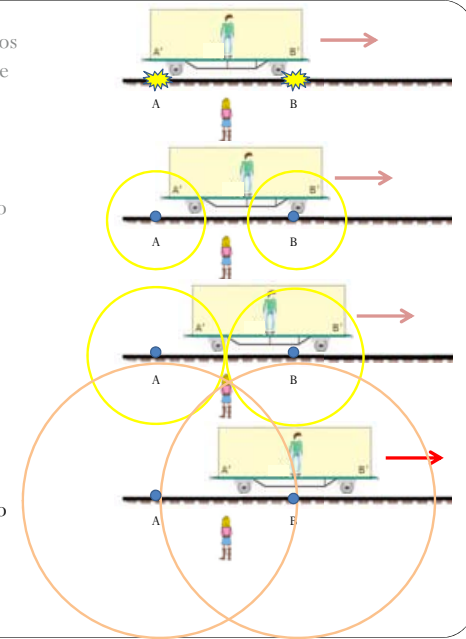
Quando os pontos A' e B' coincidem com os pontos A e B são emitidos simultaneamente dois sinais luminosos, em A e em B .

O sinal luminoso proveniente de B atinge o David.

Os sinais luminosos provenientes de A e B atingem a Alice.

O que está a acontecer?

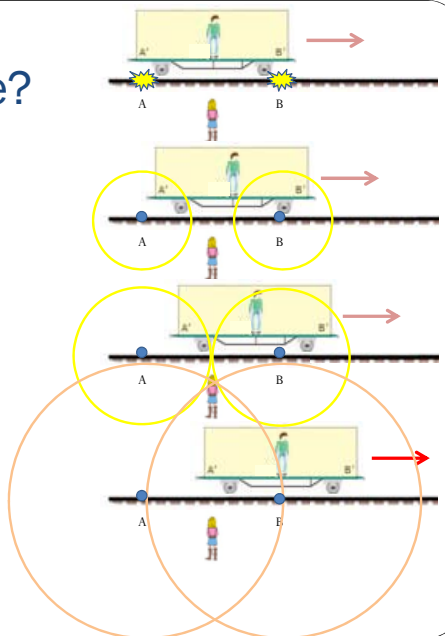
O sinal luminoso proveniente de A atinge o David.



22

O que vê a Alice?

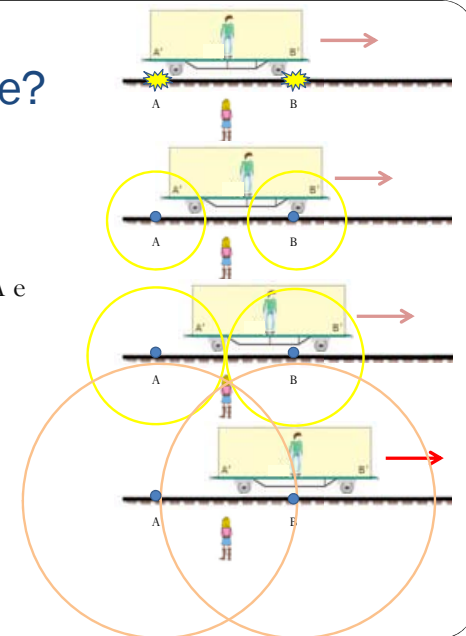
-
-



23

O que vê a Alice?

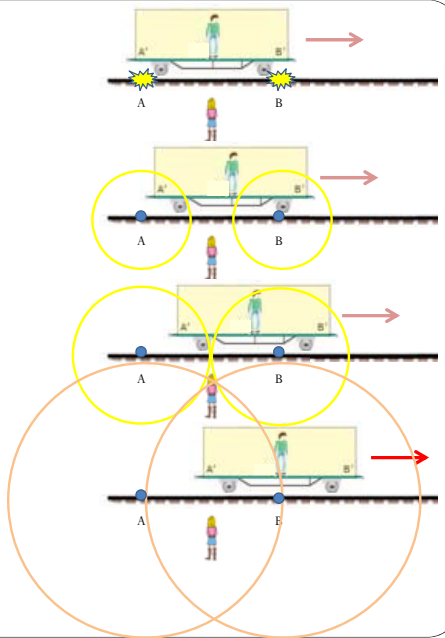
- Vê o David a mover-se para a direita.
- Vê dois sinais luminosos (de A e de B) chegarem até si em simultâneo (ou no mesmo instante).



24

Para a Alice

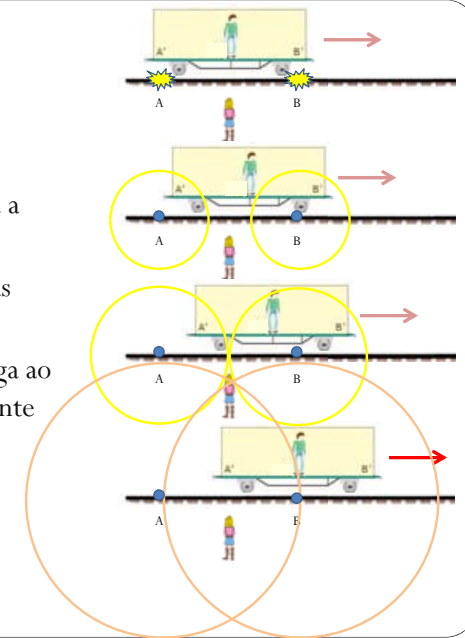
-
-
-



25

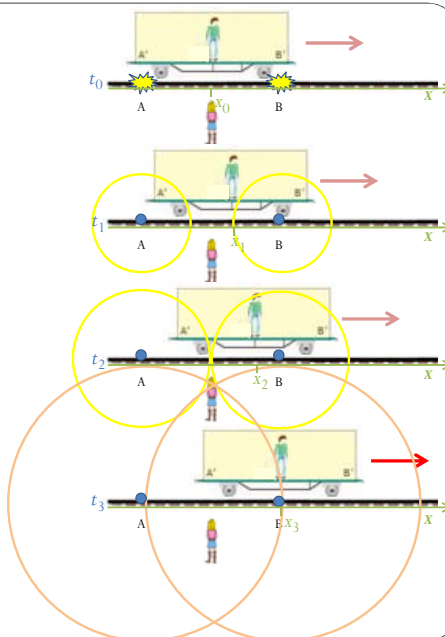
Para a Alice

- O David está a mover-se para a direita.
- A emissão dos dois sinais pelas fontes são simultâneos.
- O sinal proveniente de B chega a David antes do sinal proveniente de A.



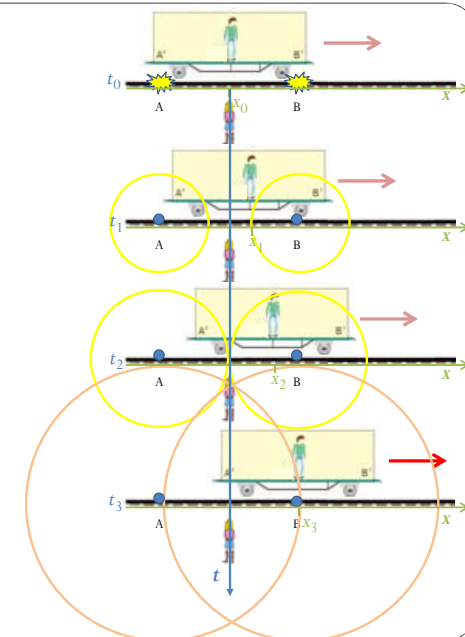
26

Podemos acrescentar um eixo de referência ao referencial Terra, em que a origem das posições, x_0 , corresponde à posição em que a Alice e o David passam um pelo outro e se inicia a contagem dos tempos, t_0 .



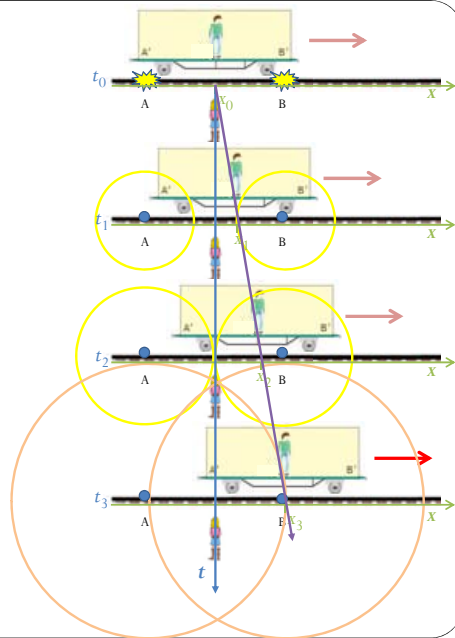
27

A Alice está parada (a sua posição não varia com o tempo), no referencial Terra.



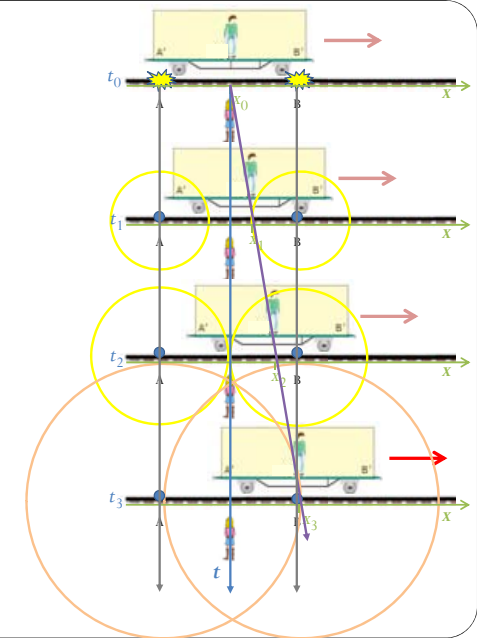
28

O David está em movimento (a sua posição varia com o tempo) em relação ao referencial Terra, com velocidade constante.



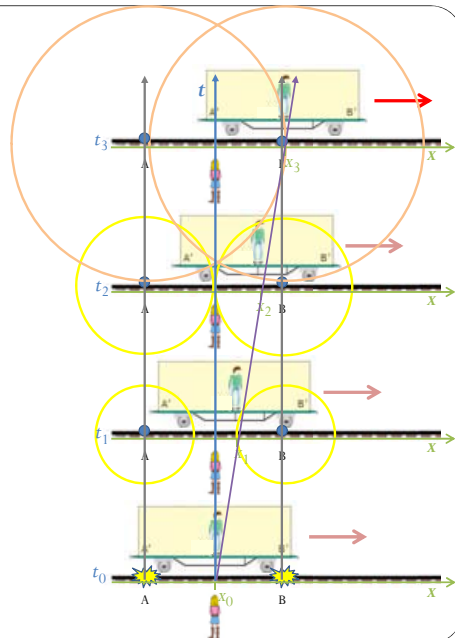
29

Os emissores flash colocados nos pontos A e B estão fixos no referencial Terra.



30

Podemos colocar a sequência de imagens partindo de baixo para cima.



31

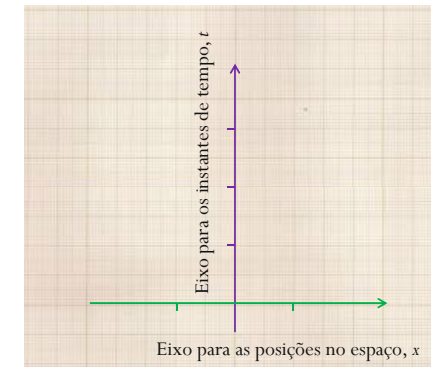
Podemos também recorrer à representação desta situação, em que a Alice está fixa no referencial Terra e o David está móvel relativamente a este referencial, utilizando diagramas de espaço-tempo.

32

O que é um diagrama de espaço-tempo?

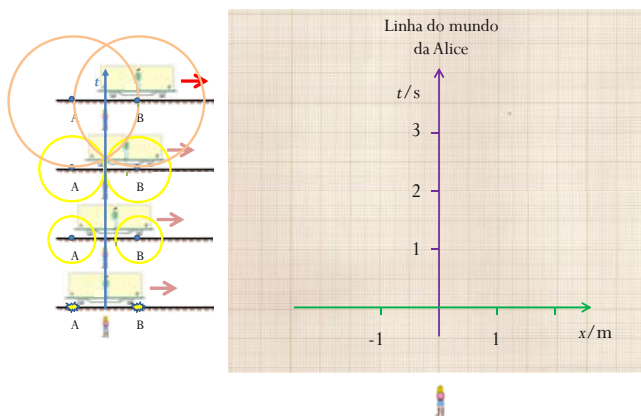
33

Diagrama de espaço-tempo



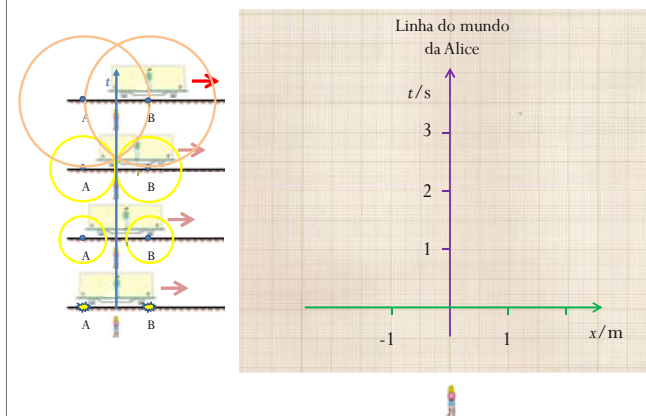
34

Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice



35

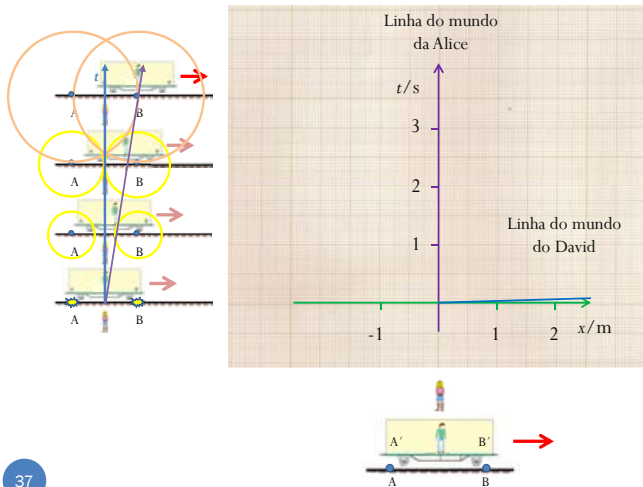
Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice



As **linhas do mundo** descrevem o movimento dos corpos, indicando as posições destes para diferentes valores de tempo decorrido.

36

Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice



O David está a mover-se com velocidade $c/2$

37

Tratando-se de movimentos com velocidades da ordem de grandeza da velocidade da luz torna-se difícil encontrar uma escala adequada para os eixos das posições (m) e dos tempos (s).

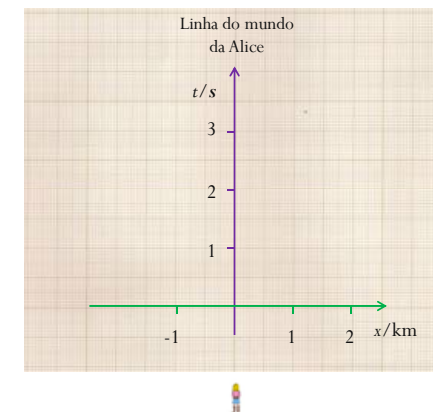
38

O diagrama de espaço-tempo pode ser alterado?

Como?

39

Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice



40

Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

Multiplica-se os valores de tempo t pelo valor constante da velocidade da luz c

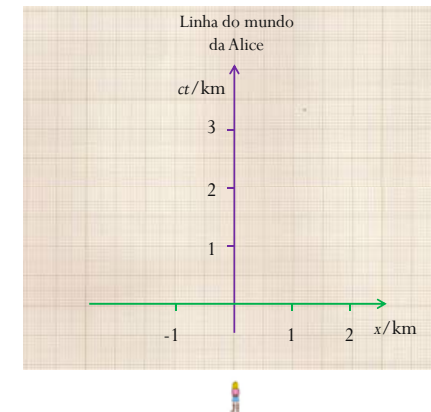


41

Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

Multiplica-se os valores de tempo t pelo valor constante da velocidade da luz c

ct é o deslocamento da luz no intervalo de tempo t



42

Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

Multiplica-se os valores de tempo t pelo valor constante da velocidade da luz c

ct é o deslocamento da luz no intervalo de tempo t

Utiliza-se este deslocamento como uma medida do tempo

$$\frac{1 \text{ km}}{3 \times 10^5 \text{ km/s}}$$

1 km corresponde a $3.3 \times 10^{-6} \text{ s}$



43

Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

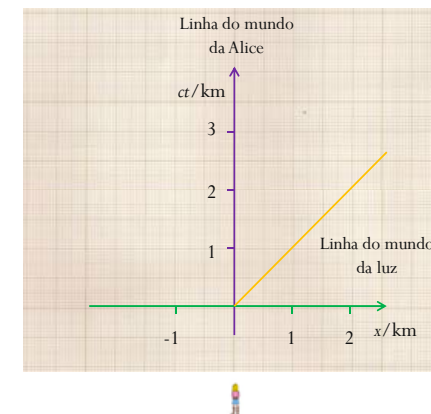
Multiplica-se os valores de tempo t pelo valor constante da velocidade da luz c

ct é o deslocamento da luz no intervalo de tempo t

Utiliza-se este deslocamento como uma medida do tempo

$$\frac{1 \text{ km}}{3 \times 10^5 \text{ km/s}}$$

1 km corresponde a $3.3 \times 10^{-6} \text{ s}$



A luz desloca-se 1 km de espaço em cada km de tempo

44

Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

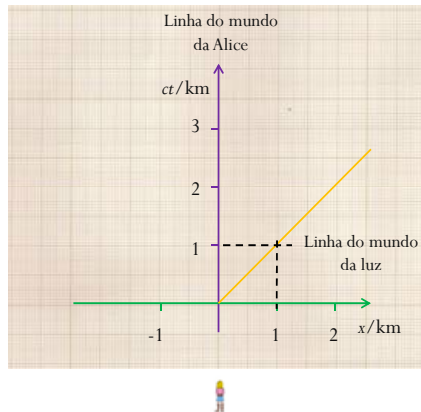
Multiplica-se os valores de tempo t pelo valor constante da velocidade da luz c

ct é o deslocamento da luz no intervalo de tempo t

Utiliza-se este deslocamento como uma medida do tempo

$$\frac{1 \text{ km}}{3 \times 10^5 \text{ km/s}}$$

1 km corresponde a $3.3 \times 10^{-6} \text{ s}$

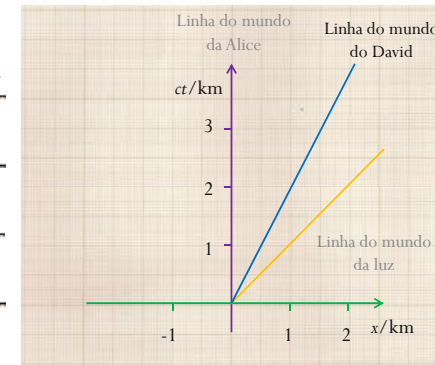
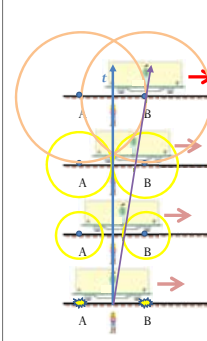


A luz desloca-se 1 km de espaço em cada km de tempo

Nestas condições, a velocidade da luz passa a ser exatamente 1

45

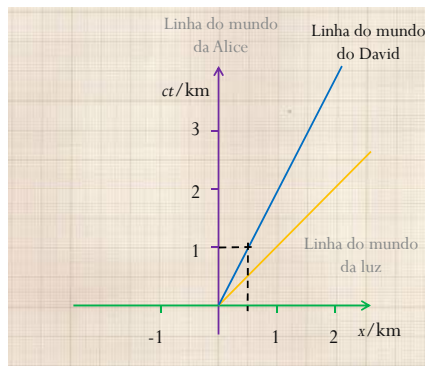
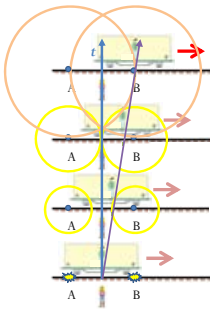
Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice



A velocidade do David é $c/2$

46

Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

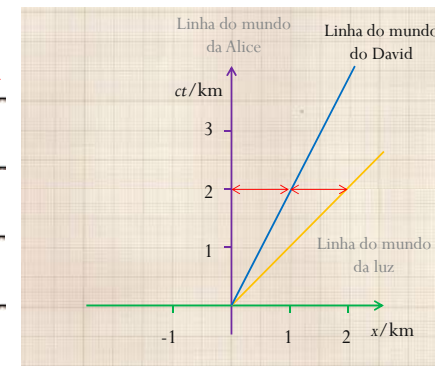
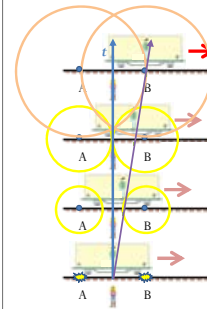


A velocidade do David é $c/2$

Ou seja, o David desloca-se 0.5 km de espaço em cada km de tempo.

47

Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice



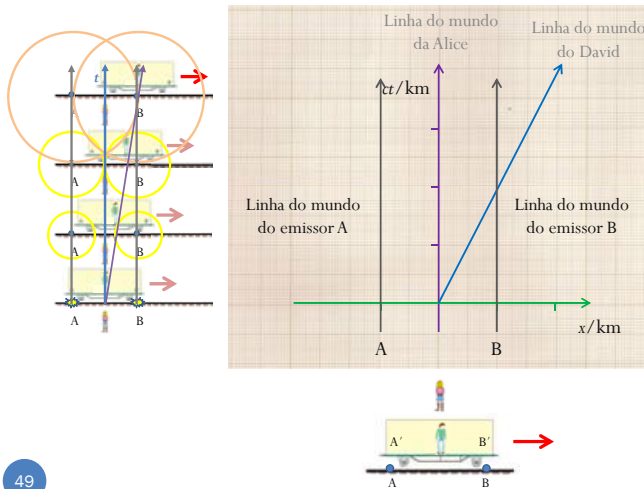
A velocidade do David é $c/2$

Ou seja, o David desloca-se 0.5 km de espaço em cada km de tempo.

Em cada instante a distância entre a Alice e o David é igual à distância entre o David e o sinal luminoso

48

Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice



O que acontece no ponto C?

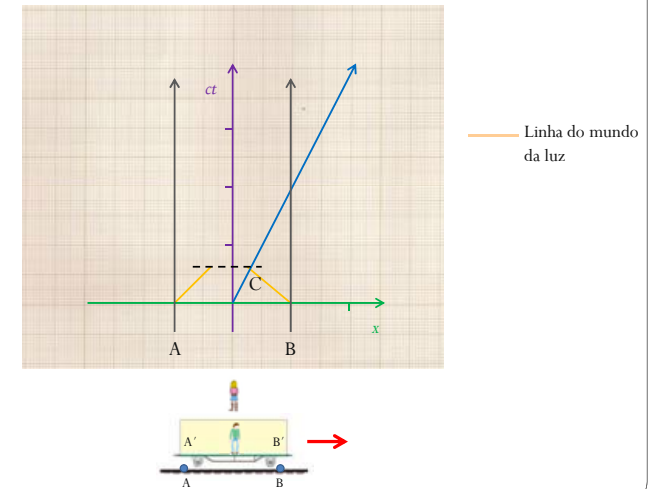
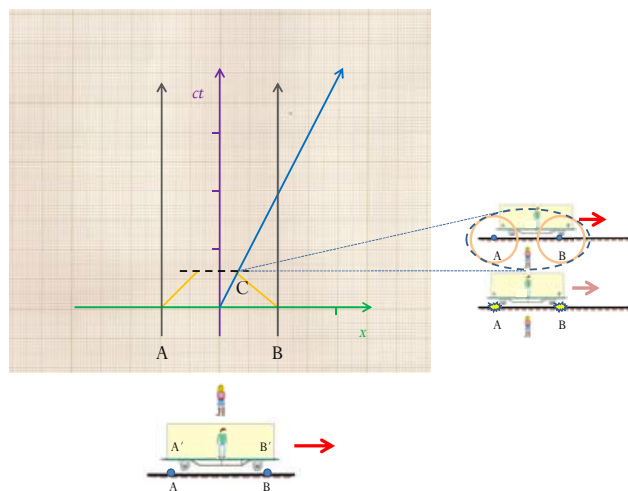


Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

O que acontece no ponto C?

O sinal luminoso B
atinge o David



O que acontece no ponto D?

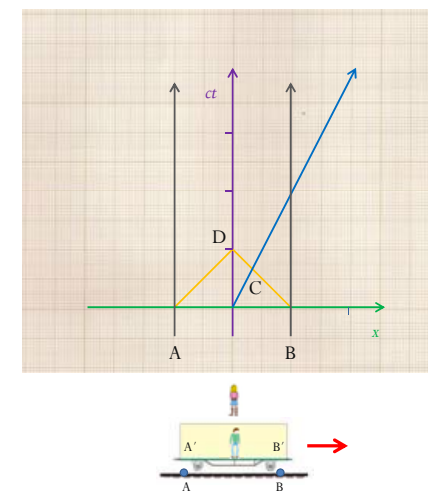
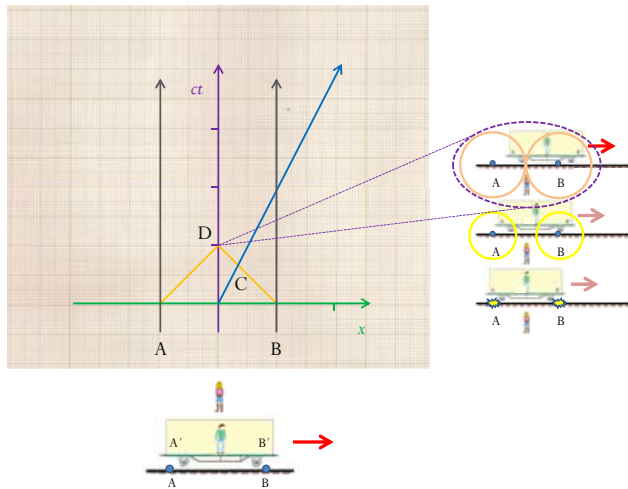


Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

O que acontece no ponto D?

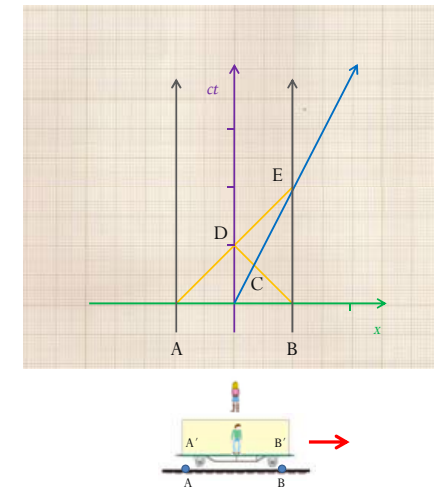
Os sinais luminosos A e B atingem a Alice simultaneamente



53

Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

O que acontece no ponto E?

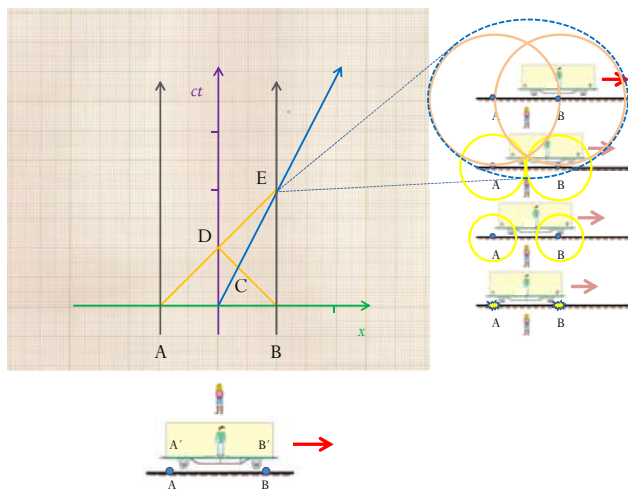


54

Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

O que acontece no ponto E?

O sinal luminoso A atinge o David

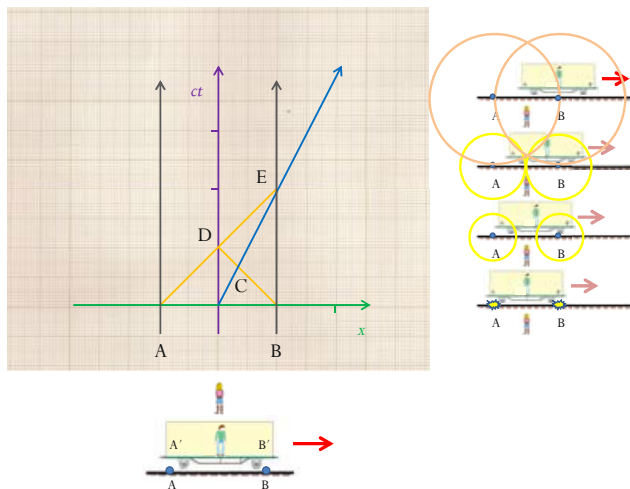


55

Quais são os instantes, no referencial da Alice, em que os feixes de luz provenientes dos emissores A e B atingem a Alice e o David?

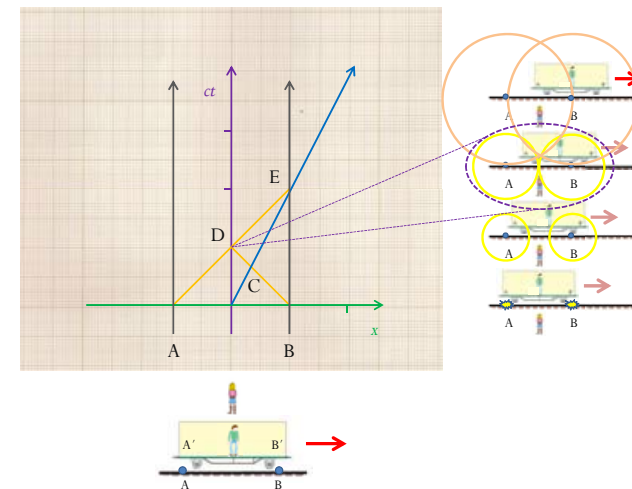
56

Quais são os instantes, no referencial da Alice, em que os feixes de luz provenientes dos emissores A e B a atingem?



57

Quais são os instantes, no referencial da Alice, em que os feixes de luz provenientes dos emissores A e B a atingem?



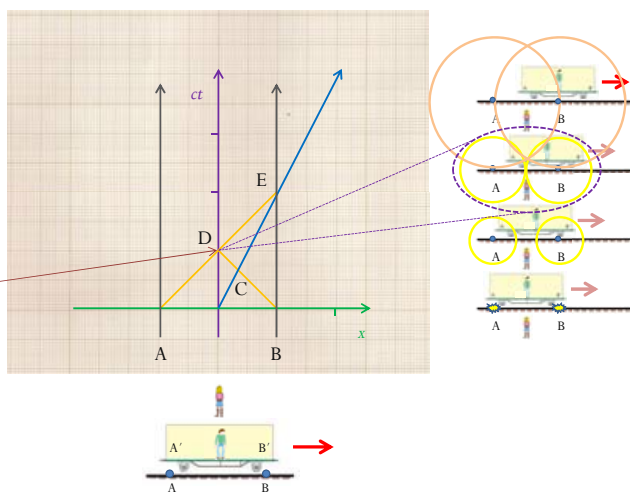
58

Quais são os instantes, no referencial da Alice, em que os feixes de luz provenientes dos emissores A e B a atingem?

Os sinais luminosos A e B atingem a Alice no ponto D

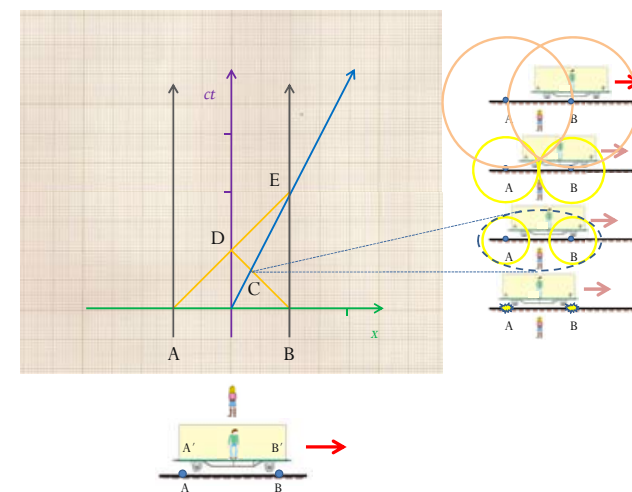
$$ct = 1.0 \text{ km}$$

$$t = 3.3 \times 10^{-6} \text{ s} = 3.3 \mu\text{s}$$



59

Quais são os instantes, no referencial da Alice, em que os feixes de luz provenientes dos emissores A e B atingem o David?



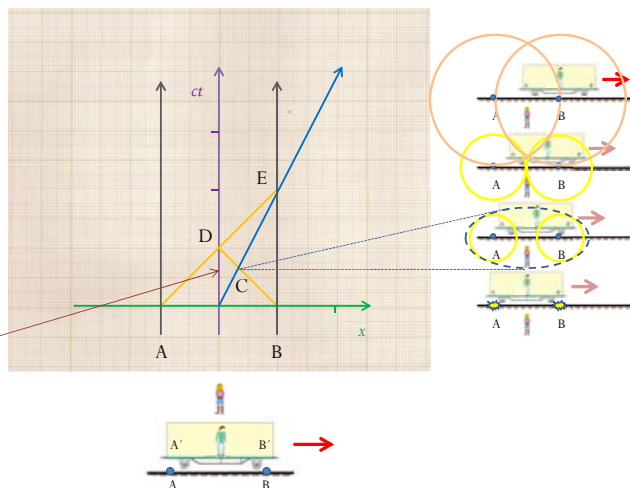
60

Quais são os instantes, no referencial da Alice, em que os feixes de luz provenientes dos emissores A e B atingem o David?

O sinal luminoso B atinge o David no ponto C

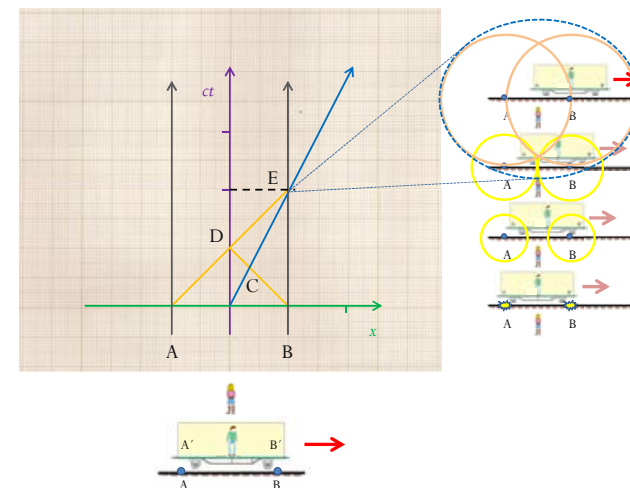
$$\alpha = 0.65 \text{ km}$$

$$t = 2.2 \times 10^{-6} \text{ s} = 2.2 \mu\text{s}$$



61

Quais são os instantes, no referencial da Alice, em que os feixes de luz provenientes dos emissores A e B atingem o David?



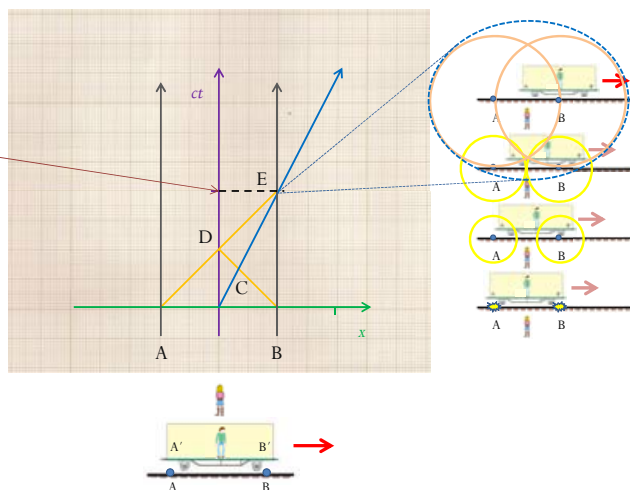
62

Quais são os instantes, no referencial da Alice, em que os feixes de luz provenientes dos emissores A e B atingem o David?

O sinal luminoso A atinge o David no ponto E

$$\alpha = 2.0 \text{ km}$$

$$t = 6.7 \times 10^{-6} \text{ s} = 6.7 \mu\text{s}$$



63

Quais são os instantes, no referencial da Alice, em que os feixes de luz provenientes dos emissores A e B atingem o David?

O sinal luminoso A atinge o David no ponto E

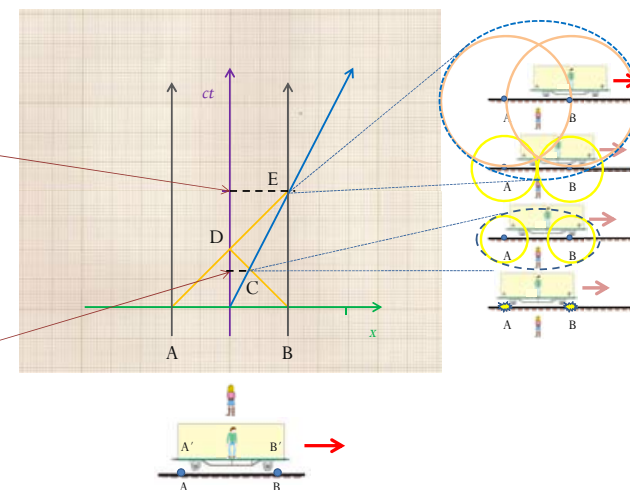
$$\alpha = 2.0 \text{ km}$$

$$t = 6.7 \times 10^{-6} \text{ s} = 6.7 \mu\text{s}$$

O sinal luminoso B atinge o David no ponto C

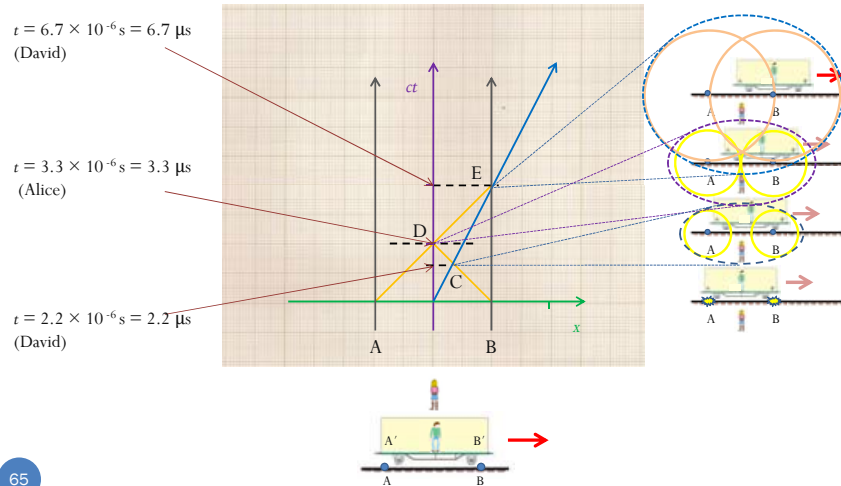
$$\alpha = 0.65 \text{ km}$$

$$t = 2.2 \times 10^{-6} \text{ s} = 2.2 \mu\text{s}$$



64

Quais são os instantes, no referencial da Alice, em que os feixes de luz provenientes dos emissores A e B atingem a Alice e o David?



65

Ou seja ...

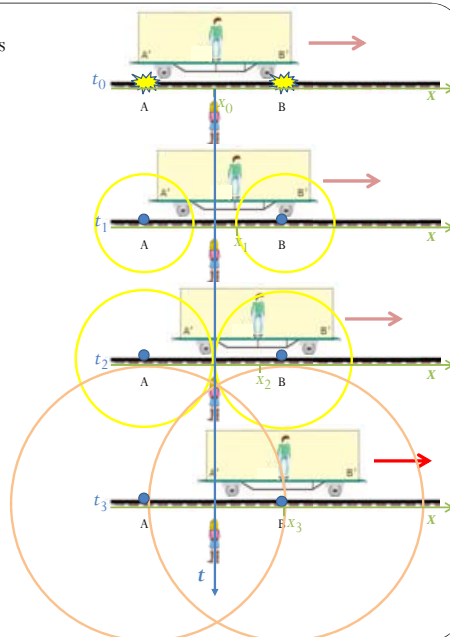
66

Quando os pontos A' e B' coincidem com os pontos A e B existe a emissão simultânea de dois sinais luminosos em A e em B.

O sinal luminoso proveniente de B atinge o David.

Os sinais luminosos provenientes de A e B atingem a Alice.

O sinal luminoso proveniente de A atinge o David.



67

Quando os pontos A' e B' coincidem com os pontos A e B existe a emissão simultânea de dois sinais luminosos em A e em B.

$$t_0 = 0 \text{ s}$$

O sinal luminoso proveniente de B atinge o David.

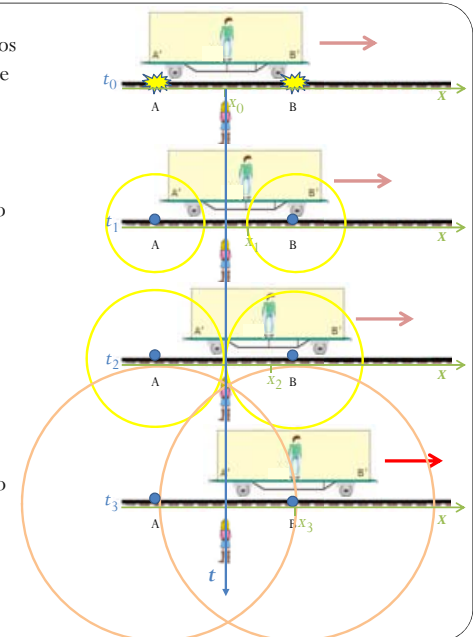
$$t_1 = 2.2 \mu\text{s}$$

Os sinais luminosos provenientes de A e B atingem a Alice.

$$t_2 = 3.3 \mu\text{s}$$

O sinal luminoso proveniente de A atinge o David.

$$t_3 = 6.7 \mu\text{s}$$



68

Para a Alice

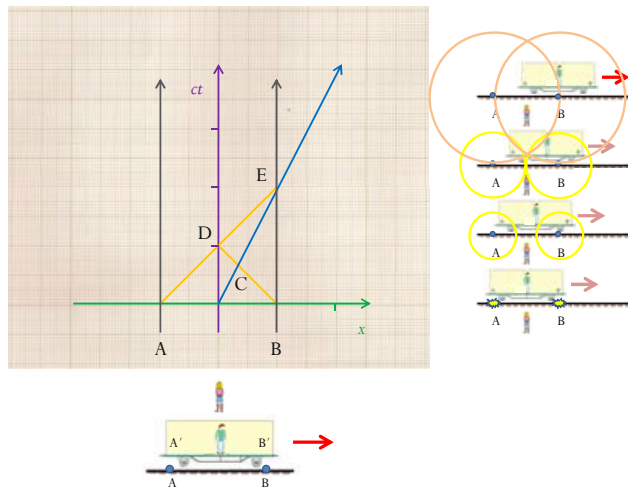
- Os acontecimentos são simultâneos.
- Visualiza os dois feixes de luz em simultâneo ao fim de $3.3 \mu\text{s}$.
- A Alice afirma que o David se desloca para a direita e vê primeiro o feixe de luz proveniente do emissor B, ao fim do tempo $2.2 \mu\text{s}$. E só depois vê o feixe de luz proveniente do emissor A, ao fim do tempo $6.7 \mu\text{s}$.

69

Quais são os valores lidos nos eixos x e ct para os pontos A, B, C, D e E?

70

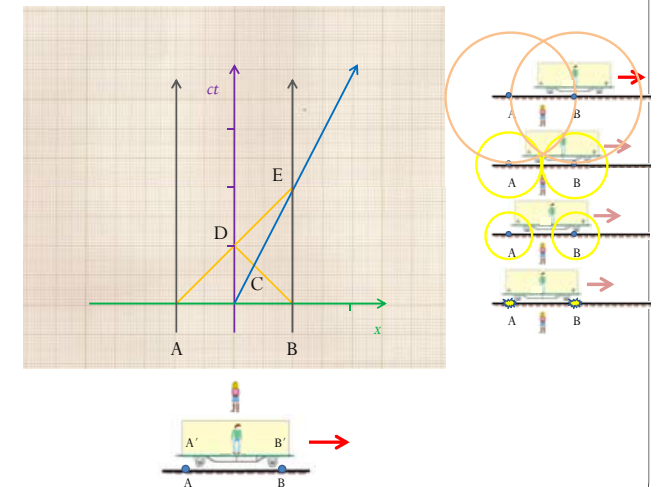
Quais são os valores lidos nos eixos x e ct para os pontos A, B, C, D e E?



71

Quais são os valores lidos nos eixos x e ct para os pontos A, B, C, D e E?

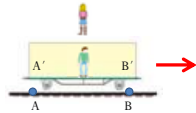
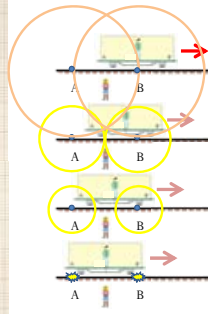
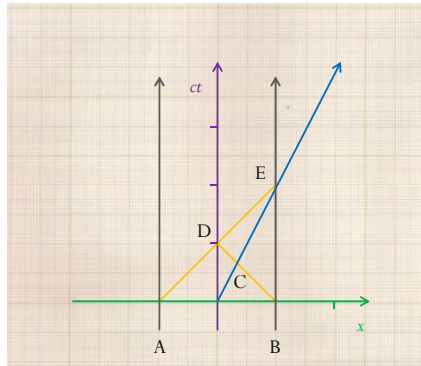
	x/km	ct/km
A		
B		
C		
D		
E		



72

Quais são os valores lidos nos eixos x e ct para os pontos A, B, C, D e E?

	x/km	ct/km
A	-1.00	0.00
B	1.00	0.00
C	0.35	0.65
D	0.00	1.00
E	1.00	2.00



73

	x/km	ct/km	$t/\mu\text{s}$
A	-1.00	0.00	0.0
B	1.00	0.00	0.0
C	0.35	0.65	2.2
D	0.00	1.00	3.3
E	1.00	2.00	6.7

74

Para a Alice

- Os acontecimentos são simultâneos.
- Visualiza os dois feixes de luz em simultâneo ao fim de $3.3 \mu\text{s}$.
- Afirma que o David, se desloca para a direita e vê primeiro o feixe de luz proveniente do emissor B, ao fim do tempo $2.2 \mu\text{s}$, na posição 0.35 km . E depois, vê o feixe de luz proveniente do emissor A, ao fim do tempo $6.7 \mu\text{s}$, na posição 1.00 km .

75

Quando é que dois acontecimentos são simultâneos?

76

Dois acontecimentos são simultâneos num referencial quando ocorrem ao mesmo tempo nesse referencial.

Em geral, acontecimentos simultâneos não são observados ao mesmo tempo, devido a diferentes tempos de viagem da luz desde o ponto onde o evento ocorreu até ao observador.

Abordagem da Simultaneidade (2)

Teoria da Relatividade Restrita

Simultaneidade de Acontecimentos 2



Referenciais

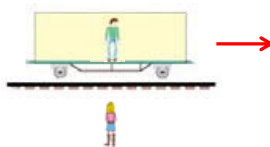
- Um referencial de inércia fixo na Terra.
- Um referencial de inércia fixo numa carruagem que se movimenta relativamente ao solo com velocidade $c/2$.



2

Referenciais

- Um referencial de inércia fixo na Terra.
- Um referencial de inércia fixo numa carruagem que se movimenta relativamente ao solo com velocidade $c/2$.



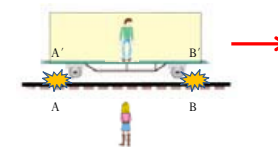
Observadores

- Alice, observadora ligada ao referencial fixo na Terra.
- David, observador ligado ao referencial fixo na carruagem.

3

Referenciais

- Um referencial de inércia fixo na Terra.
- Um referencial de inércia fixo numa carruagem que se movimenta relativamente ao solo com velocidade $c/2$.



Observadores

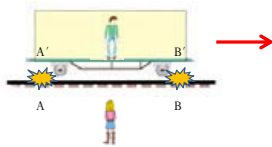
- Alice, observadora ligada ao referencial fixo na Terra.
- David, observador ligado ao referencial fixo na carruagem.

4

Acontecimentos

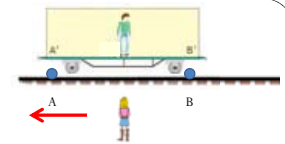
Quando os pontos A e B coincidem com os pontos A' e B', os emissores flash colocados nos pontos A e B do carril emitem 2 sinais luminosos.

O que vê o David?



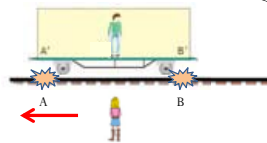
5

Quando os pontos A' e B' coincidem com os pontos A e B são emitidos simultaneamente dois sinais luminosos, em A e em B.



6

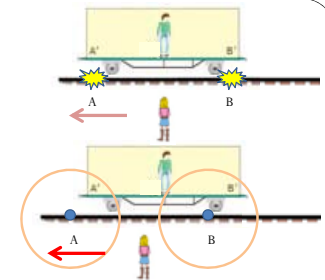
Quando os pontos A' e B' coincidem com os pontos A e B são emitidos simultaneamente dois sinais luminosos, em A e em B.



7

Quando os pontos A' e B' coincidem com os pontos A e B são emitidos simultaneamente dois sinais luminosos, em A e em B.

O que está a acontecer?

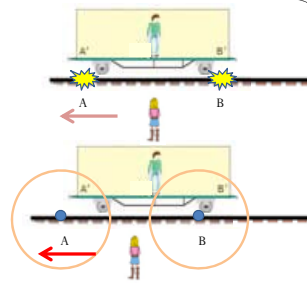


8

Quando os pontos A' e B' coincidem com os pontos A e B são emitidos simultaneamente dois sinais luminosos, em A e em B .

O que está a acontecer?

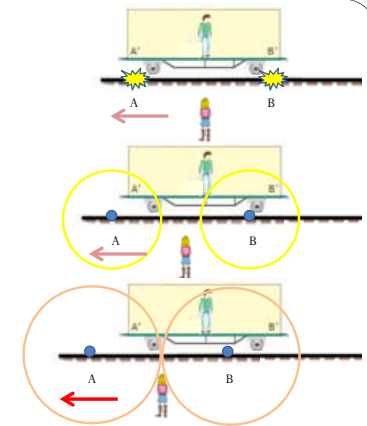
O sinal luminoso proveniente de B atinge o David.



Quando os pontos A' e B' coincidem com os pontos A e B são emitidos simultaneamente dois sinais luminosos, em A e em B .

O sinal luminoso proveniente de B atinge o David.

O que está a acontecer?

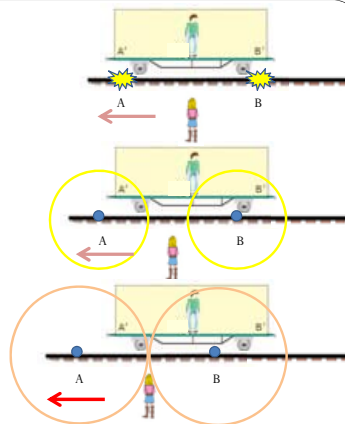


Quando os pontos A' e B' coincidem com os pontos A e B são emitidos simultaneamente dois sinais luminosos, em A e em B .

O sinal luminoso proveniente de B atinge o David.

O que está a acontecer?

Os sinais luminosos provenientes de A e B atingem a Alice.

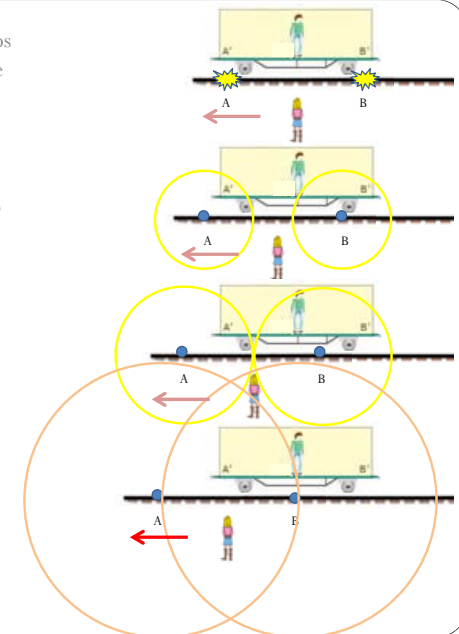


Quando os pontos A' e B' coincidem com os pontos A e B são emitidos simultaneamente dois sinais luminosos, em A e em B .

O sinal luminoso proveniente de B atinge o David.

Os sinais luminosos provenientes de A e B atingem a Alice.

O que está a acontecer?



Quando os pontos A' e B' coincidem com os pontos A e B são emitidos simultaneamente dois sinais luminosos, em A e em B .

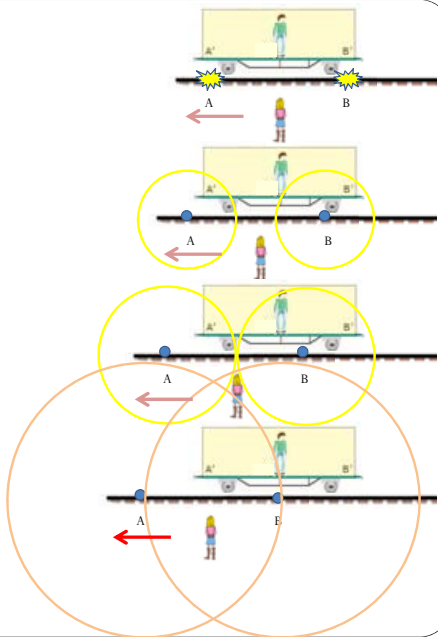
O sinal luminoso proveniente de B atinge o David.

Os sinais luminosos provenientes de A e B atingem a Alice.

O que está a acontecer?

O sinal luminoso proveniente de A atinge o David.

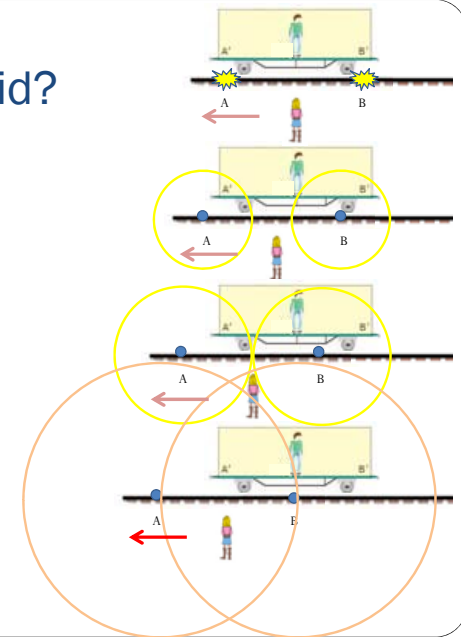
13



O que vê o David?

-
-
-

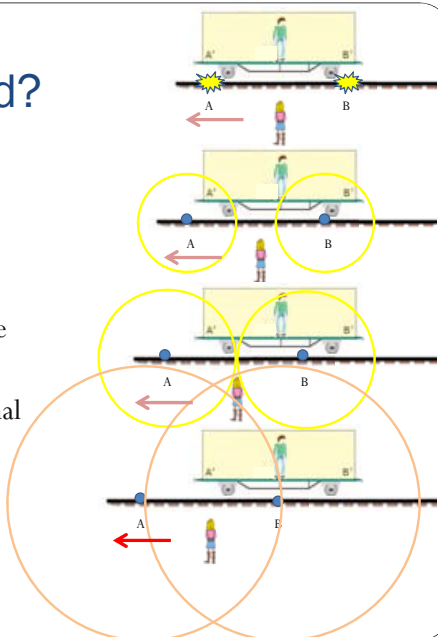
14



O que vê o David?

- Vê a Alice a mover-se para a esquerda, com velocidade constante.
- Vê o sinal luminoso proveniente de B chegar em primeiro lugar.
- Posteriormente, vê chegar o sinal luminoso proveniente de A .

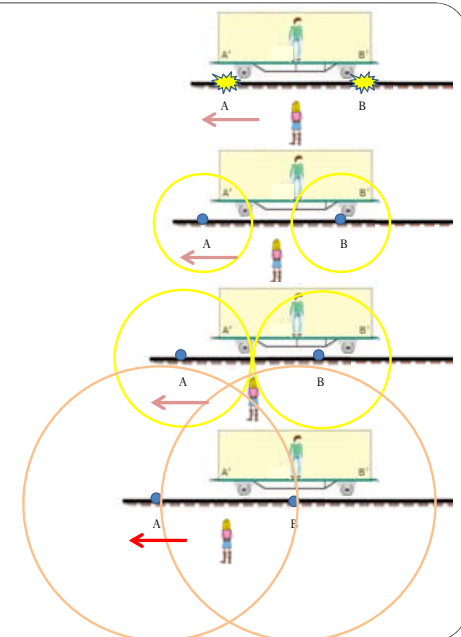
15



Para o David?

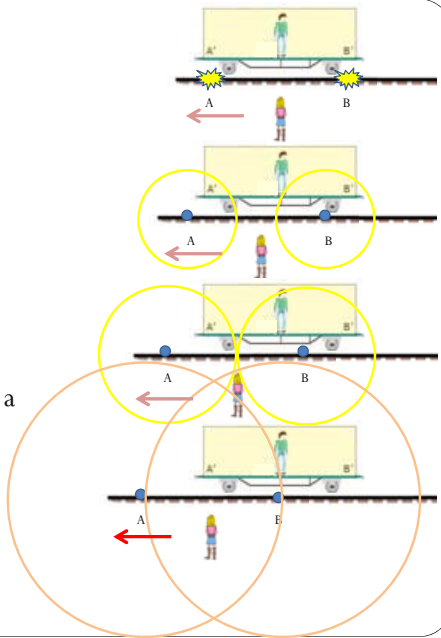
-
-
-
-
-

16



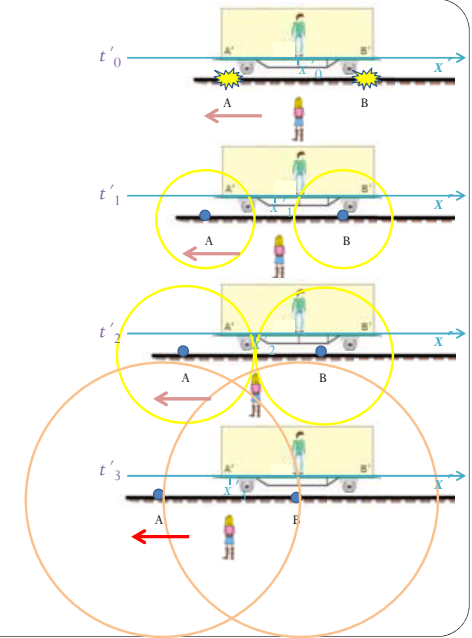
Para o David?

- A Alice está a mover-se para a esquerda.
- Vê chegar em primeiro lugar o sinal B.
- E posteriormente sinal A.
- Como se encontra à mesma distância de A e B', conclui que a emissão dos dois sinais não são simultâneos.
- A Alice vê chegar os dois sinais em simultâneo.



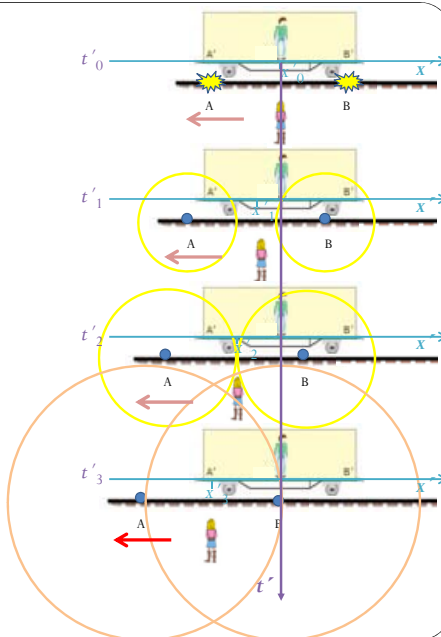
17

Podemos acrescentar um eixo de referência ao referencial Terra, em que a origem das posições, x'_0 , corresponde à posição em que a Alice e o David passam um pelo outro e se inicia a contagem dos tempos, t'_0 .



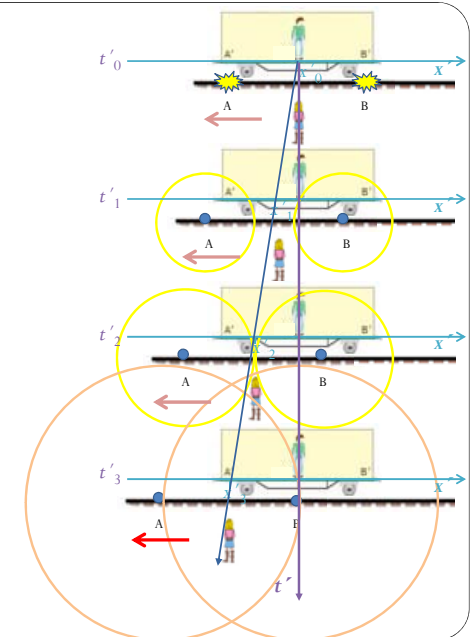
18

O David está parado (a sua posição não varia com o tempo), no referencial carruagem.



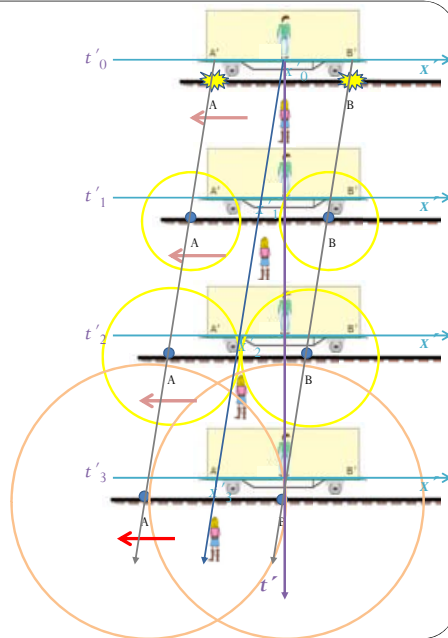
19

A Alice está em movimento (a sua posição varia com o tempo) em relação ao referencial carruagem, com velocidade constante.



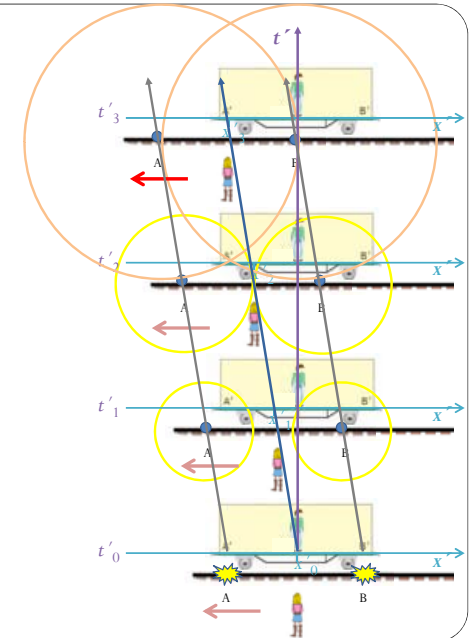
20

Os emissores flash colocados nos pontos A e B estão em movimento (a sua posição varia com o tempo) em relação ao referencial carruagem, com velocidade constante.



21

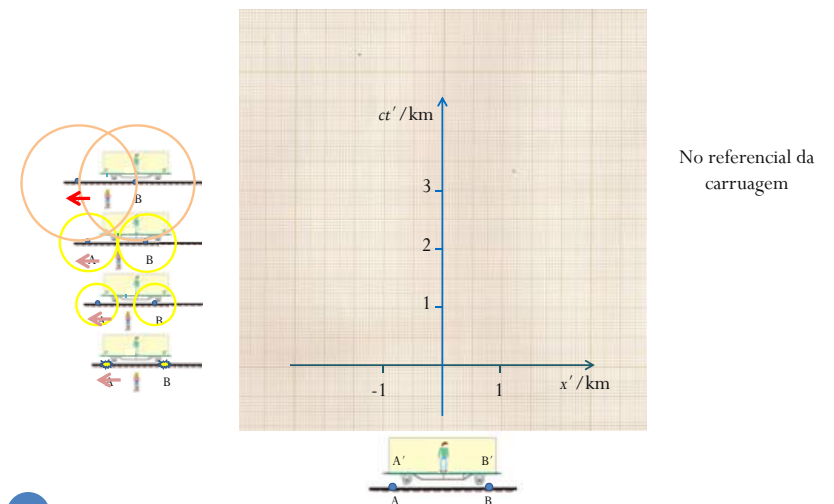
Podemos colocar a sequência de imagens partindo de baixo para cima.



22

Podemos também recorrer à representação desta situação utilizando diagramas de espaço-tempo (esboço)

Diagrama de espaço-tempo no referencial do David

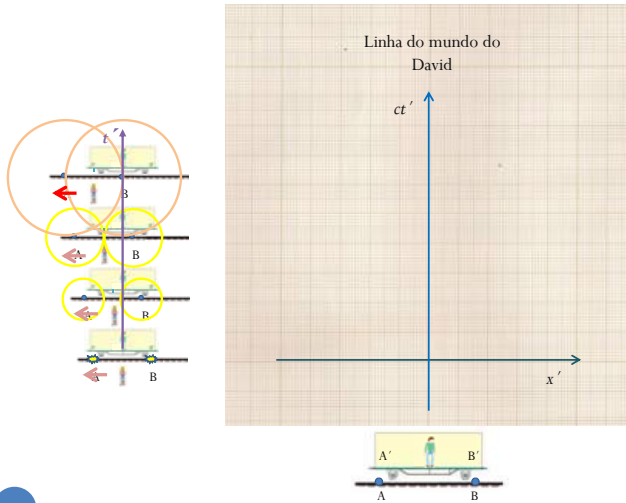


No referencial da carruagem

23

24

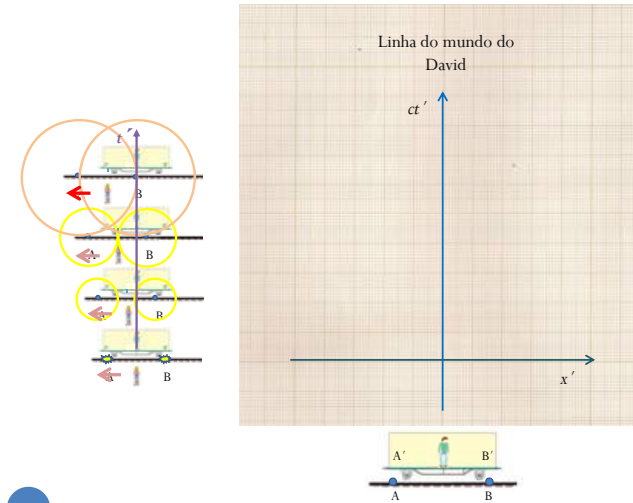
Diagrama de espaço-tempo no referencial do David



Eixo dos tempos (neste caso ct') do referencial carruagem é dado pela linha do mundo do observador David. Neste caso são coincidentes porque o David está fixo na origem do referencial carruagem.

25

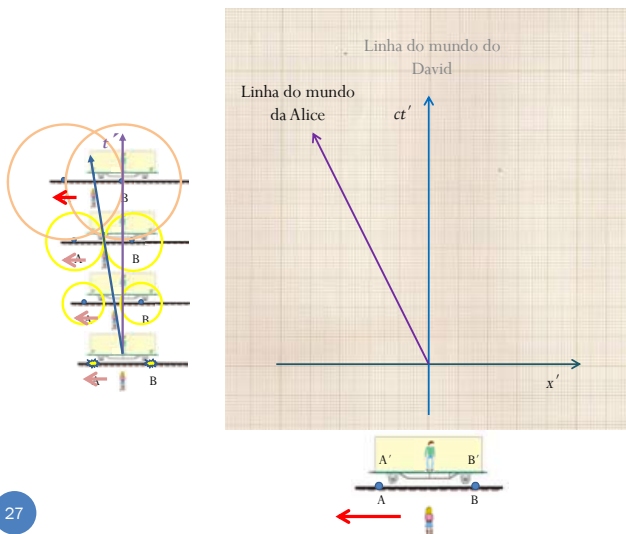
Diagrama de espaço-tempo no referencial do David



David está parado (no referencial da carruagem)

26

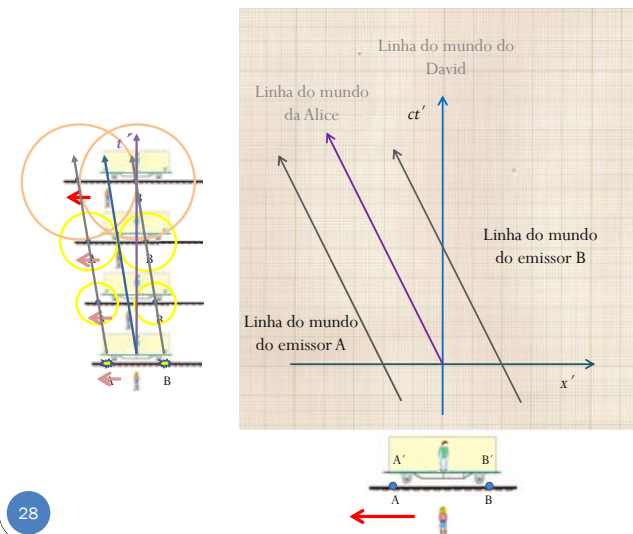
Diagrama de espaço-tempo no referencial do David



A Alice move-se com velocidade $c/2$

27

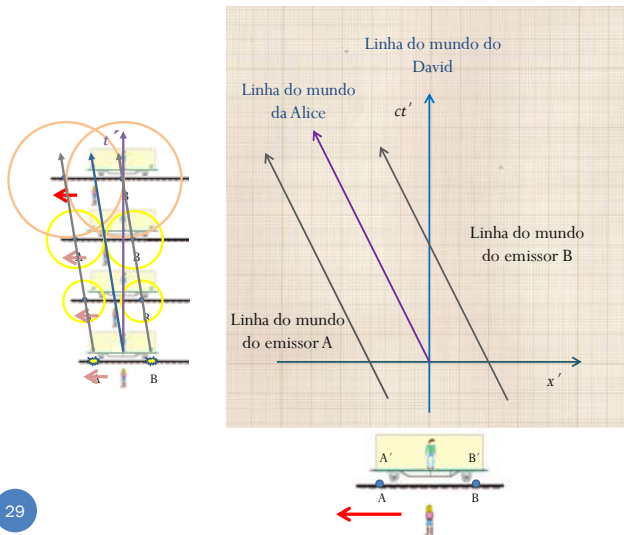
Diagrama de espaço-tempo no referencial do David



Os emissores flash colocados nos pontos A e B também se movem com velocidade $c/2$

28

Diagrama de espaço-tempo no referencial do David



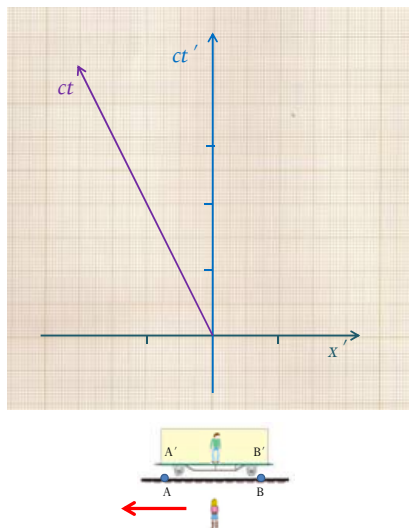
29

Para marcarmos os pontos A e B, onde ocorre a emissão dos sinais luminosos, necessitamos de marcar o eixo das posições x no referencial da Alice

30

Diagrama de espaço-tempo no referencial do David

Os eixos dos “tempos”, para cada referencial (ct e ct') são dados pelas linhas do mundo da origem, em cada referencial onde estão os observadores Alice e David.

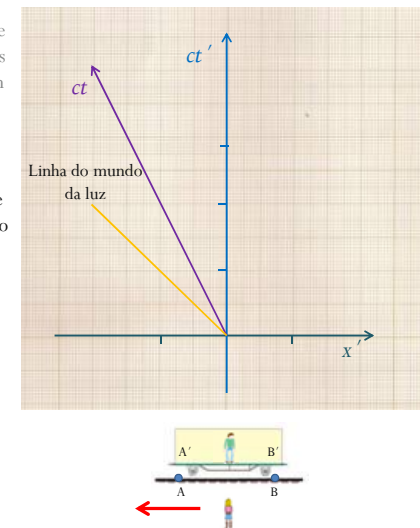


31

Diagrama de espaço-tempo no referencial do David

Os eixos dos “tempos”, para cada referencial (ct e ct') são dados pelas linhas do mundo da origem, em cada referencial onde estão os observadores Alice e David.

Os eixos das posições x e x' também dependem do referencial.

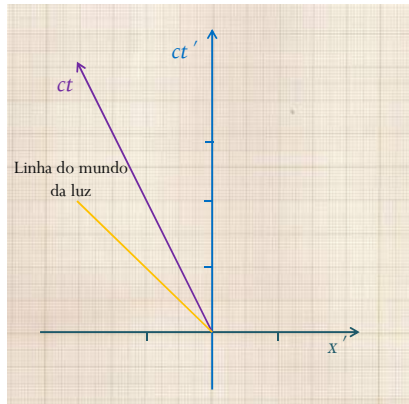


32

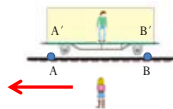
Diagrama de espaço-tempo no referencial do David

Os eixos dos “tempos”, para cada referencial (ct e ct') são dados pelas linhas do mundo da origem, em cada referencial onde estão os observadores Alice e David.

Os eixos das posições x e x' também dependem do referencial.



Já vimos que neste tipo de diagrama a luz se desloca 1 km de espaço em cada km de tempo, ou seja, a velocidade da luz é igual a 1



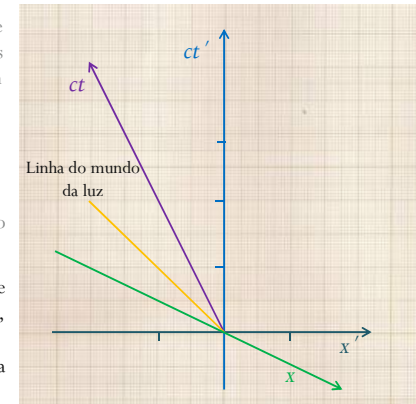
33

Diagrama de espaço-tempo no referencial do David

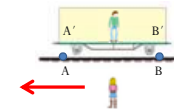
Os eixos dos “tempos”, para cada referencial (ct e ct') são dados pelas linhas do mundo da origem, em cada referencial onde estão os observadores Alice e David.

Os eixos das posições x e x' também dependem do referencial.

Para assegurar que a luz se desloca com velocidade 1, o ângulo que o eixo das posições (x e x') faz com a horizontal é igual ao ângulo que o eixo dos tempos (eixo ct e ct') faz com a vertical.

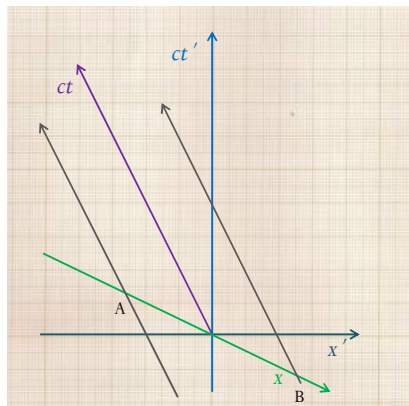


Já vimos que neste tipo de diagrama a luz se desloca 1 km de espaço em cada km de tempo, ou seja, a velocidade da luz é igual a 1

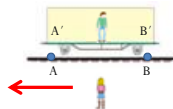


34

Diagrama de espaço-tempo no referencial do David



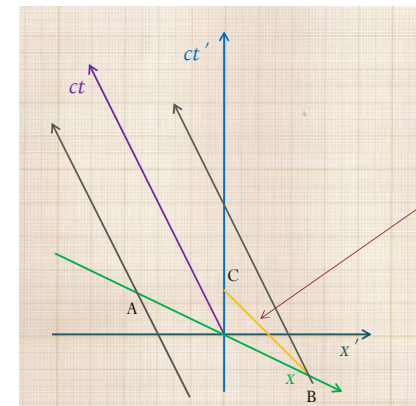
Marcamos os pontos A e B e as linhas do mundo dos emissores flash colocados nos pontos A e B



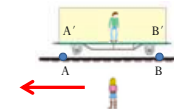
35

Diagrama de espaço-tempo no referencial do David

O que acontece no ponto C?



Linha do mundo da luz proveniente do emissor colocado no ponto B

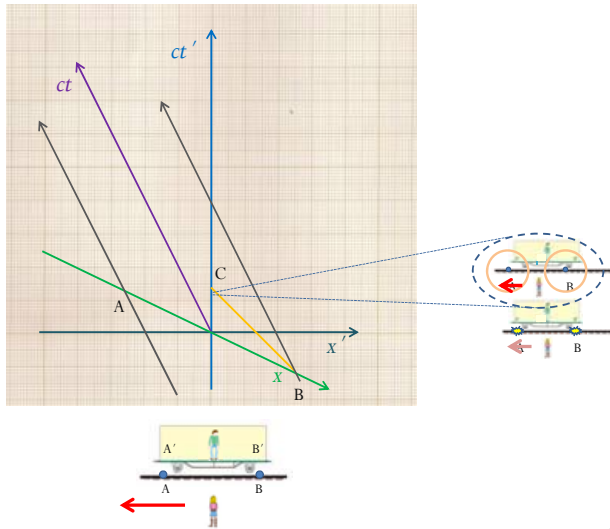


36

Diagrama de espaço-tempo no referencial do David

O que acontece no ponto C?

O sinal luminoso proveniente do emissor B atinge o David

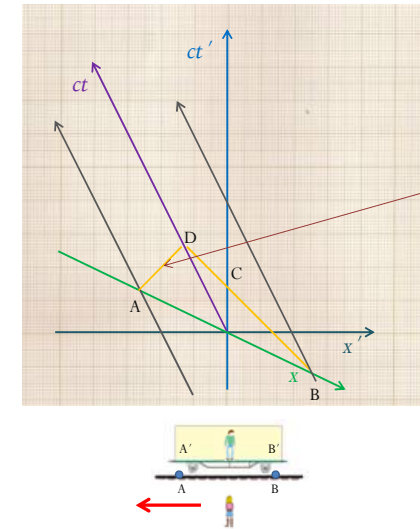


37

Diagrama de espaço-tempo no referencial do David

O que acontece no ponto D?

Linha do mundo da luz proveniente do emissor colocado no ponto A

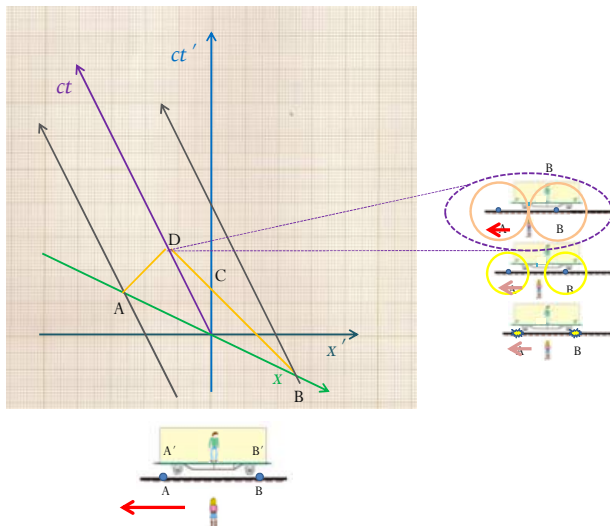


38

Diagrama de espaço-tempo no referencial do David

O que acontece no ponto D?

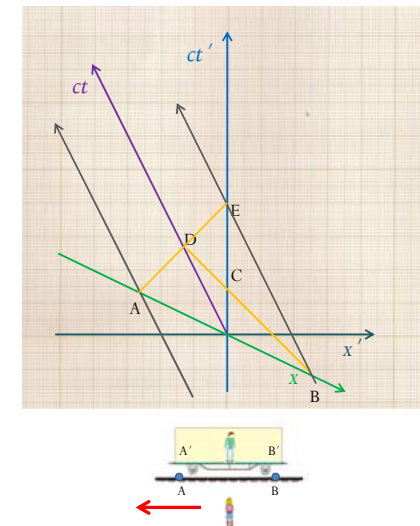
Os sinais luminosos provenientes dos emissores A e B atingem a Alice simultaneamente



39

Diagrama de espaço-tempo no referencial do David

O que acontece no ponto E?

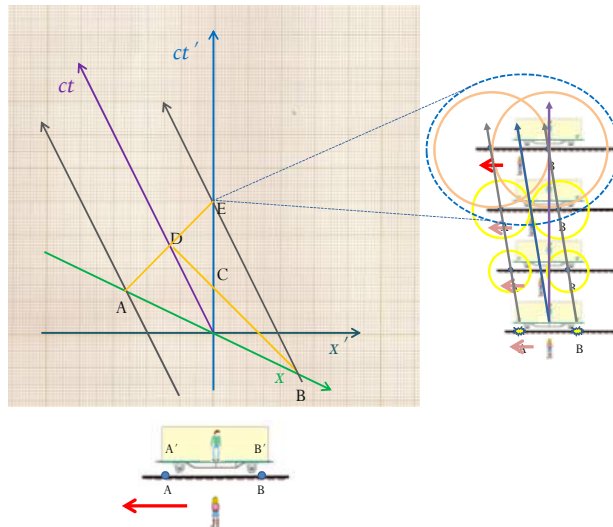


40

Diagrama de espaço-tempo no referencial do David

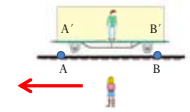
O que acontece no ponto E?

O sinal luminoso proveniente do emissor A atinge o David



41

Para o David



- Os acontecimentos não são simultâneos.
- Visualiza primeiro o feixe de luz proveniente do emissor B, e só depois vê o feixe de luz proveniente do emissor A.
- Como se encontra à mesma distância de A' e B', conclui que a emissão dos dois sinais não são simultâneos.

42

Abordagem da Simultaneidade (3)

Teoria da Relatividade Restrita

Simultaneidade de Acontecimentos 3



Existe uma quantidade que se mantém invariante quando mudamos de referencial de inércia que é o intervalo no espaço-tempo entre dois acontecimentos.

2

Como vê a Alice a trajetória do sinal luminoso?

Recordando



Os acontecimentos

- emissão de um sinal luminoso pela lâmpada L, fixa no chão da carruagem, na direção do espelho E, fixo no teto da carruagem, quando a Alice e o David passam um pelo outro.
- reflexão do sinal luminoso no espelho E e regresso à lâmpada L.

3

Como vê a Alice a trajetória do sinal luminoso?

Recordando



Os observadores

- A Alice, observadora ligada ao referencial fixo na Terra.
- O David, observador ligado ao referencial fixo na carruagem, que se movimenta com velocidade v em relação à Terra.

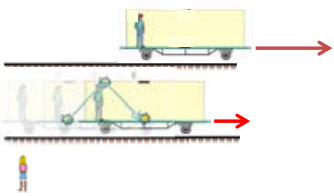
Os acontecimentos

- emissão de um sinal luminoso pela lâmpada L, fixa no chão da carruagem, na direção do espelho E, fixo no teto da carruagem, quando a Alice e o David passam um pelo outro.
- reflexão do sinal luminoso no espelho E e regresso à lâmpada L.

4

Como vê a Alice a trajetória do sinal luminoso?

No referencial da Alice



Os observadores

- A Alice, observadora ligada ao referencial fixo na Terra.
- O David, observador ligado ao referencial fixo na carruagem, que se movimenta com velocidade v em relação à Terra.

E ainda,

- um terceiro observador, Carlos, ligado ao referencial fixo de outra carruagem, que se movimenta com velocidade v' , maior que a velocidade v da carruagem do David, em relação à Terra.

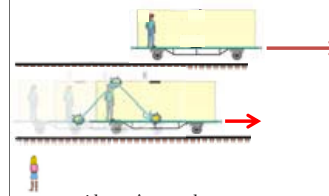
Os acontecimentos

- emissão de um sinal luminoso pela lâmpada L, fixa no chão da carruagem, na direção do espelho E, fixo no teto da carruagem, quando a Alice e o David passam um pelo outro.
- reflexão do sinal luminoso no espelho E e regresso à lâmpada L.

5

Como vê a Alice a trajetória do sinal luminoso?

No referencial da Alice



Os observadores

- A Alice, observadora ligada ao referencial fixo na Terra.
- O David, observador ligado ao referencial fixo na carruagem, que se movimenta com velocidade v em relação à Terra.

E ainda,

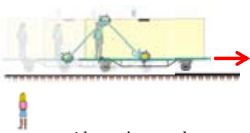
- um terceiro observador, Carlos, ligado ao referencial fixo de outra carruagem, que se movimenta com velocidade v' , maior que a velocidade v da carruagem do David, em relação à Terra.

Alice vê o sinal luminoso descrever uma trajetória retilínea e inclinada em relação à horizontal em cada um dos percursos antes e depois da reflexão no espelho E.

6

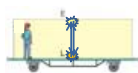
Como é que os diferentes observadores veem a trajetória do sinal luminoso?

No referencial da Alice



Alice vê o sinal luminoso descrever uma trajetória retilínea e inclinada em relação à horizontal em cada um dos percursos antes e depois da reflexão no espelho E.

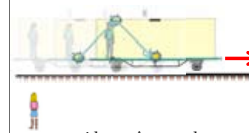
No referencial do David



7

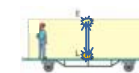
Como é que os diferentes observadores veem a trajetória do sinal luminoso?

No referencial da Alice



Alice vê o sinal luminoso descrever uma trajetória retilínea e inclinada em relação à horizontal em cada um dos percursos antes e depois da reflexão no espelho E.

No referencial do David



O David vê o sinal luminoso a descrever uma trajetória retilínea e vertical. Primeiro para cima e depois para baixo.

8

Como é que os diferentes observadores veem a trajetória do sinal luminoso?

No referencial da Alice

No referencial do David

No referencial do Carlos



Alice vê o sinal luminoso descrever uma trajetória retilínea e inclinada em relação à horizontal em cada um dos percursos antes e depois da reflexão no espelho E.



O David vê o sinal luminoso a descrever uma trajetória retilínea e vertical. Primeiro para cima e depois para baixo.

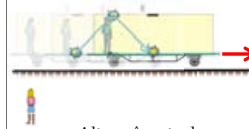


Como é que os diferentes observadores veem a trajetória do sinal luminoso?

No referencial da Alice

No referencial do David

No referencial do Carlos



Alice vê o sinal luminoso descrever uma trajetória retilínea e inclinada em relação à horizontal em cada um dos percursos antes e depois da reflexão no espelho E.



O David vê o sinal luminoso a descrever uma trajetória retilínea e vertical. Primeiro para cima e depois para baixo.

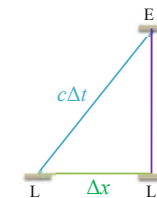



Carlos, observador da segunda carruagem, vê o sinal luminoso descrever uma trajetória retilínea e inclinada em relação à horizontal em cada um dos percursos antes e depois da reflexão no espelho E, mas em sentido oposto ao da Alice.




$c\Delta t$ é a distância, percorrida pelo sinal luminoso desde L até E (a distância de E a L é igual).

Δx é a distância que a carruagem anda, quando o sinal luminoso percorre o trajeto de L a E.






No referencial da Alice



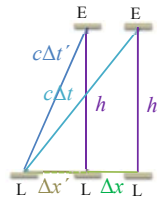
No referencial do David



No referencial do Carlos

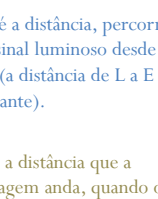
$c\Delta t$ é a distância, percorrida pelo sinal luminoso desde L até E (a distância de E a L é igual).

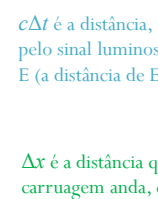
Δx é a distância que a carruagem anda, quando o sinal luminoso percorre o trajeto de L a E.

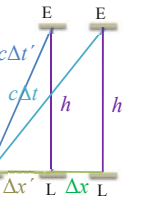



$c\Delta t'$ é a distância, percorrida pelo sinal luminoso desde E até L (a distância de L a E é invariante).

$\Delta x'$ é a distância que a carruagem anda, quando o sinal luminoso percorre o trajeto de E a L.











No referencial da Alice



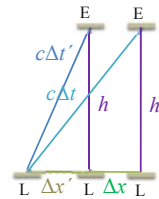
No referencial do David



No referencial do Carlos

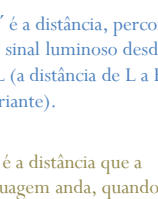
$c\Delta t$ é a distância, percorrida pelo sinal luminoso desde L até E (a distância de E a L é igual).

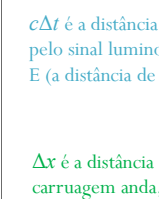
Δx é a distância que a carruagem anda, quando o sinal luminoso percorre o trajeto de L a E.

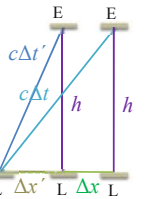



$c\Delta t'$ é a distância, percorrida pelo sinal luminoso desde E até L (a distância de L a E é invariante).

$\Delta x'$ é a distância que a carruagem anda, quando o sinal luminoso percorre o trajeto de E a L.











No referencial da Alice



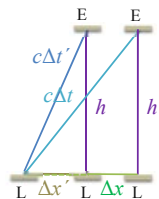
No referencial do David



No referencial do Carlos

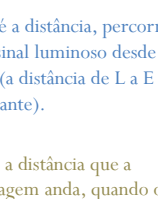
$c\Delta t$ é a distância, percorrida pelo sinal luminoso desde L até E (a distância de E a L é igual).

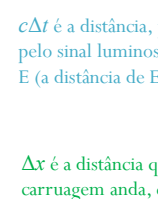
Δx é a distância que a carruagem anda, quando o sinal luminoso percorre o trajeto de L a E.

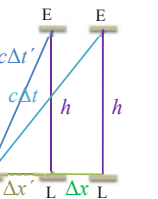



$c\Delta t'$ é a distância, percorrida pelo sinal luminoso desde E até L (a distância de L a E é invariante).

$\Delta x'$ é a distância que a carruagem anda, quando o sinal luminoso percorre o trajeto de E a L.











No referencial da Alice



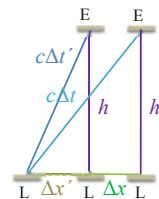
No referencial do David



No referencial do Carlos

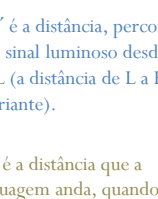
$c\Delta t$ é a distância, percorrida pelo sinal luminoso desde L até E (a distância de E a L é igual).

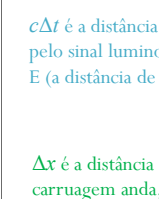
Δx é a distância que a carruagem anda, quando o sinal luminoso percorre o trajeto de L a E.

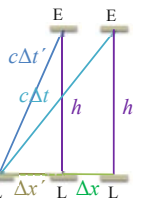


$c\Delta t'$ é a distância, percorrida pelo sinal luminoso desde E até L (a distância de L a E é invariante).

$\Delta x'$ é a distância que a carruagem anda, quando o sinal luminoso percorre o trajeto de E a L.







$c\Delta t$ é a distância, percorrida pelo sinal luminoso desde L até E (a distância de E a L é igual).

Δx é a distância que a carruagem anda, quando o sinal luminoso percorre o trajeto de L a E.

$h^2 = (c\Delta t)^2 - (\Delta x)^2$

Ou seja, $c^2(\Delta t)^2 - (\Delta x)^2 = c^2(\Delta t')^2 - (\Delta x')^2$

Definindo o **intervalo de espaço-tempo** s entre dois acontecimentos como sendo

$s^2 = c^2(\Delta t)^2 - (\Delta x)^2$

significa que tem o mesmo valor em todos os referenciais inerciais, ou seja, é invariante.

$c\Delta t'$ é a distância, percorrida pelo sinal luminoso desde E até L (a distância de L a E é invariante).

$\Delta x'$ é a distância que a carruagem anda, quando o sinal luminoso percorre o trajeto de E a L.

$h^2 = (c\Delta t')^2 - (\Delta x')^2$

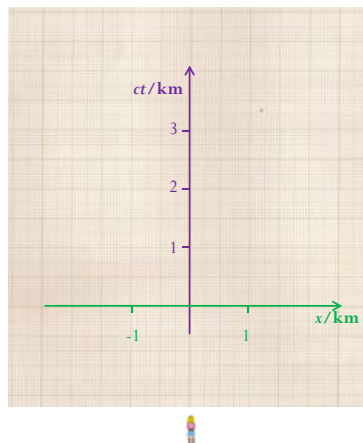
17

Deverá existir correspondência entre o diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice (referencial Terra) e o diagrama de espaço-tempo no referencial do David (referencial carruagem)

18

Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

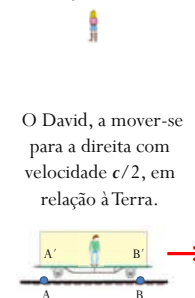
Alice em repouso, em relação à Terra.



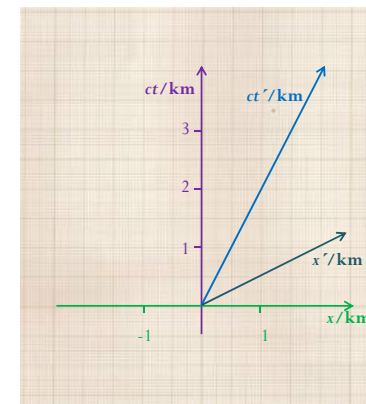
19

Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

Alice em repouso, em relação à Terra.



O David, ao mover-se para a direita com velocidade $c/2$, em relação à Terra.



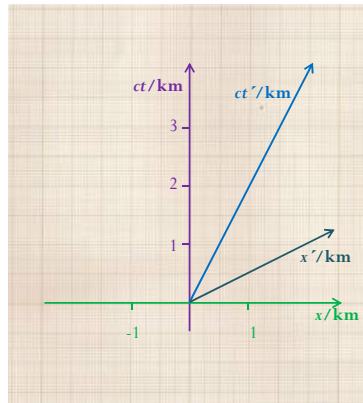
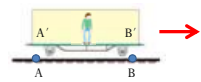
20

Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

A Alice em repouso, em relação à Terra.

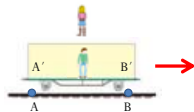


O David, a mover-se para a direita com velocidade $c/2$, em relação à Terra.



Temos de calibrar os eixos do referencial fixo na carruagem atendendo que o intervalo de espaço-tempo é invariante, ou seja:

$$c^2\Delta t'^2 - \Delta x'^2 = c^2\Delta t^2 - \Delta x^2$$

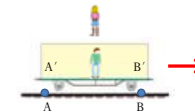
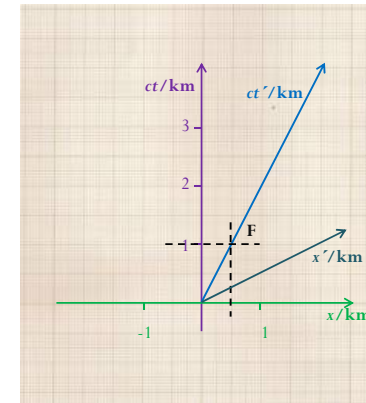


21

Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

Coordenadas do acontecimento F nos dois referenciais

$$\begin{aligned} ct &= 1 \text{ km} \\ x &= 0.5 \text{ km} \\ x' &= 0 \text{ km} \end{aligned}$$



22

Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

Coordenadas do acontecimento F nos dois referenciais

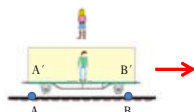
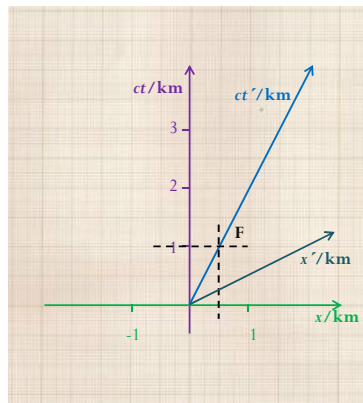
$$\begin{aligned} ct &= 1 \text{ km} \\ x &= 0.5 \text{ km} \\ x' &= 0 \text{ km} \end{aligned}$$

$$c^2\Delta t'^2 - \Delta x'^2 = c^2\Delta t^2 - \Delta x^2$$

$$1^2 - 0.5^2 = c^2\Delta t'^2 - 0^2$$

$$c^2\Delta t'^2 = 0.75$$

$$c\Delta t' = 0.87 \text{ km}$$



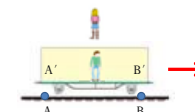
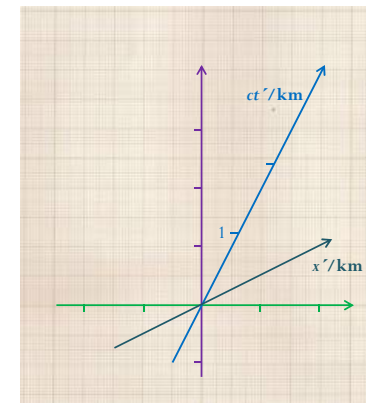
23

Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

Utilizando os valores no ponto F

$$c\Delta t' = 0.87 \text{ km}$$

Calibra-se o eixo ct'



24

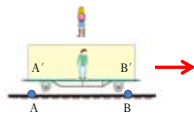
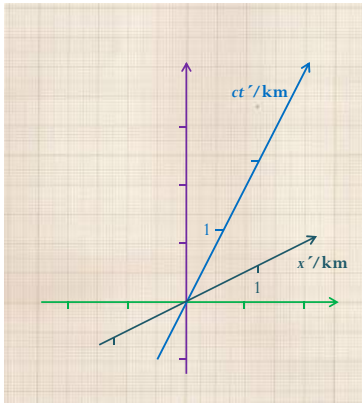
Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

Utilizando
os valores
no ponto F

$$c\Delta t' = 0.87 \text{ km}$$

Calibra-se
o eixo ct'

Calibra-se
o eixo x'



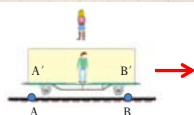
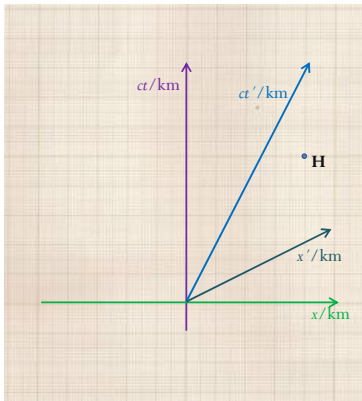
25

Como se lê as coordenadas de um ponto
neste diagrama de espaço-tempo?

26

Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

Acontecimento H:

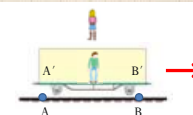
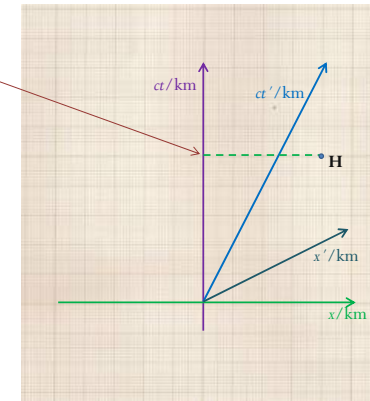


27

Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

Acontecimento H:

- Coordenada ct (linha
paralela ao eixo dos x)



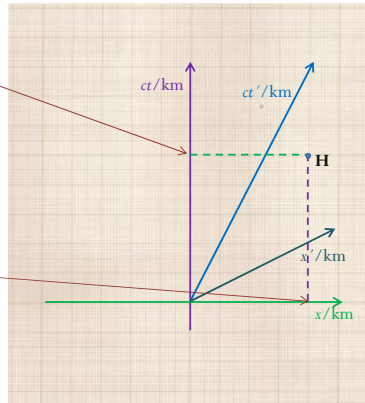
28

Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

Acontecimento H:

- Coordenada ct (linha paralela ao eixo dos x)

- Coordenada x (linha paralela ao eixo dos ct)



29

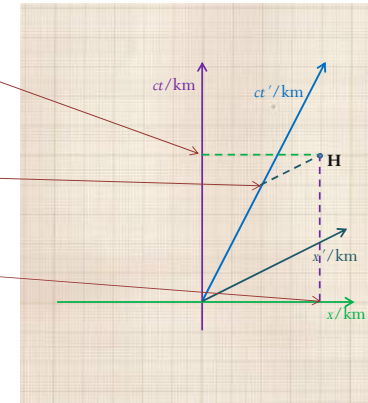
Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

Acontecimento H:

- Coordenada ct (linha paralela ao eixo dos x)

- Coordenada ct' (linha paralela ao eixo dos x')

- Coordenada x (linha paralela ao eixo dos ct)



30

Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

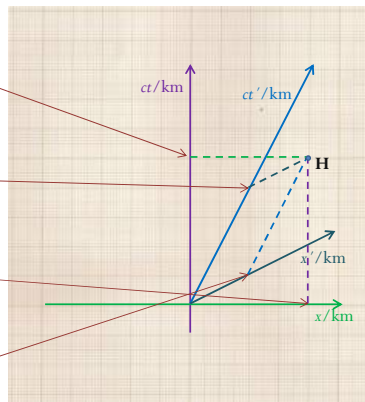
Acontecimento H:

- Coordenada ct (linha paralela ao eixo dos x)

- Coordenada ct' (linha paralela ao eixo dos x')

- Coordenada x (linha paralela ao eixo dos ct)

- Coordenada x' (linha paralela ao eixo dos ct')



31

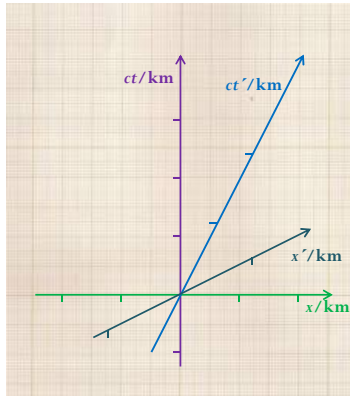
Quais são os valores lidos nos eixos para os acontecimentos A, B, C, D e E?

32

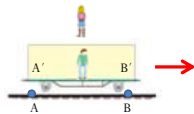
Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

Quais são os valores lidos nos eixos para os acontecimentos A, B, C, D e E?

	x/km	ct/km
A		
B		
C		
D		
E		



	x'/km	ct'/km
A		
B		
C		
D		
E		

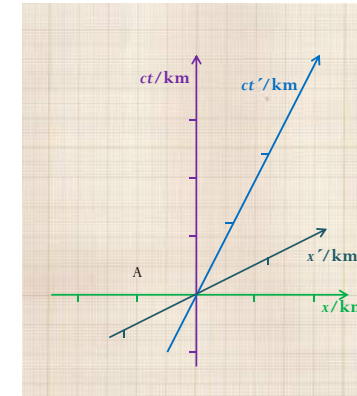


33

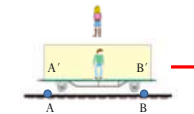
Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

Quais são os valores lidos nos eixos para o acontecimento A?

	x/km	ct/km
A		
B		
C		
D		
E		



	x'/km	ct'/km
A		
B		
C		
D		
E		

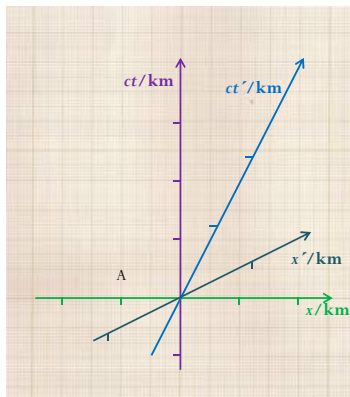


34

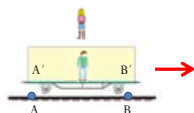
Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

Quais são os valores lidos nos eixos para o acontecimento A?

	x/km	ct/km
A	-1.00	0.00
B		
C		
D		
E		



	x'/km	ct'/km
A		
B		
C		
D		
E		

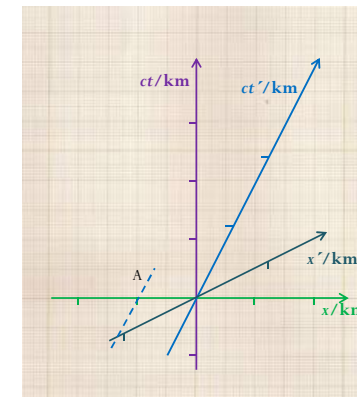


35

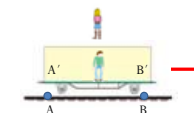
Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

Quais são os valores lidos nos eixos para o acontecimento A?

	x/km	ct/km
A	-1.00	0.00
B		
C		
D		
E		



	x'/km	ct'/km
A	-1.20	
B		
C		
D		
E		

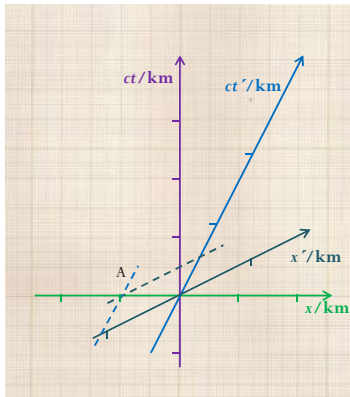


36

Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

Quais são os valores lidos nos eixos para o acontecimento A?

	x/km	ct/km
A	-1.00	0.00
B		
C		
D		
E		



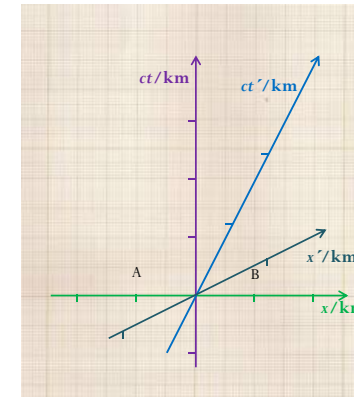
	x'/km	ct'/km
A	-1.20	0.60
B		
C		
D		
E		

37

Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

Quais são os valores lidos nos eixos para o acontecimento B?

	x/km	ct/km
A	-1.00	0.00
B		
C		
D		
E		



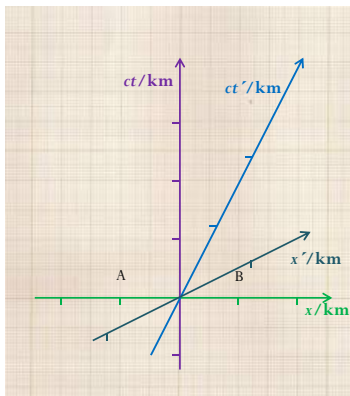
	x'/km	ct'/km
A	-1.20	0.60
B		
C		
D		
E		

38

Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

Quais são os valores lidos nos eixos para o acontecimento B?

	x/km	ct/km
A	-1.00	0.00
B	1.00	0.00
C		
D		
E		



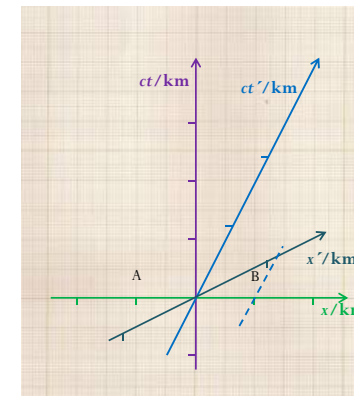
	x'/km	ct'/km
A	-1.20	0.60
B		
C		
D		
E		

39

Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

Quais são os valores lidos nos eixos para o acontecimento B?

	x/km	ct/km
A	-1.00	0.00
B	1.00	0.00
C		
D		
E		



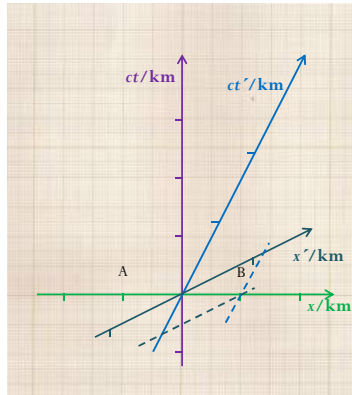
	x'/km	ct'/km
A	-1.20	0.60
B	1.20	
C		
D		
E		

40

Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

Quais são os valores lidos nos eixos para o acontecimento B?

	x/km	ct/km
A	-1.00	0.00
B	1.00	0.00
C		
D		
E		



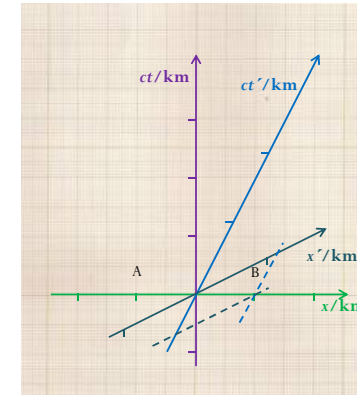
	x'/km	ct'/km
A	-1.20	0.60
B	1.20	-0.60
C		
D		
E		

41

Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

Quais são os valores lidos nos eixos para o acontecimento B?

	x/km	ct/km
A	-1.00	0.00
B	1.00	0.00
C		
D		
E		



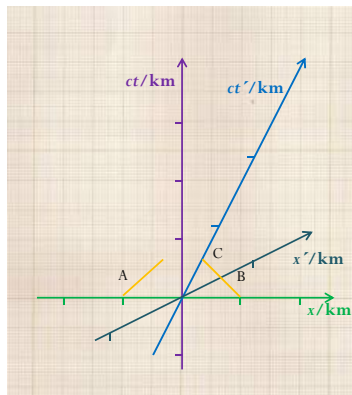
	x'/km	ct'/km
A	-1.20	0.60
B	1.20	-0.60
C		
D		
E		

42

Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

Quais são os valores lidos nos eixos para o acontecimento C?

	x/km	ct/km
A	-1.00	0.00
B	1.00	0.00
C		
D		
E		



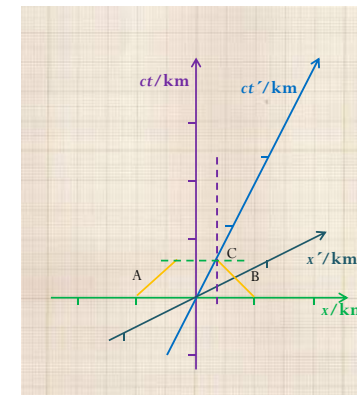
	x'/km	ct'/km
A	-1.20	0.60
B	1.20	-0.60
C		
D		
E		

43

Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

Quais são os valores lidos nos eixos para o acontecimento C?

	x/km	ct/km
A	-1.00	0.00
B	1.00	0.00
C	0.35	0.65
D		
E		



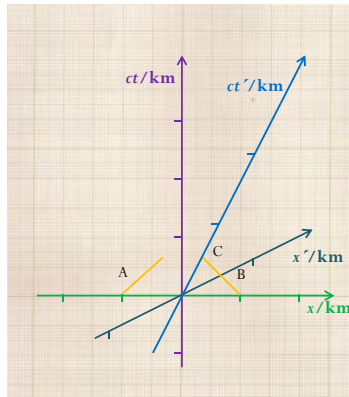
	x'/km	ct'/km
A	-1.20	0.60
B	1.20	-0.60
C		
D		
E		

44

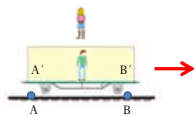
Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

Quais são os valores lidos nos eixos para o acontecimento C?

	x/km	ct/km
A	-1.00	0.00
B	1.00	0.00
C	0.35	0.65
D		
E		



	x'/km	ct'/km
A	-1.20	0.60
B	1.20	-0.60
C	0.00	0.60
D		
E		

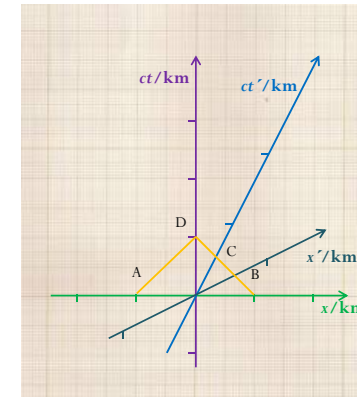


45

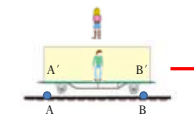
Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

Quais são os valores lidos nos eixos para o acontecimento D?

	x/km	ct/km
A	-1.00	0.00
B	1.00	0.00
C	0.35	0.65
D		
E		



	x'/km	ct'/km
A	-1.20	0.60
B	1.20	-0.60
C	0.00	0.60
D		
E		

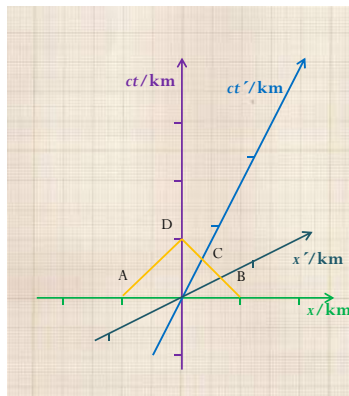


46

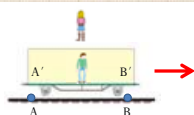
Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

Quais são os valores lidos nos eixos para o acontecimento D?

	x/km	ct/km
A	-1.00	0.00
B	1.00	0.00
C	0.35	0.65
D	0.00	1.00
E		



	x'/km	ct'/km
A	-1.20	0.60
B	1.20	-0.60
C	0.00	0.60
D		
E		

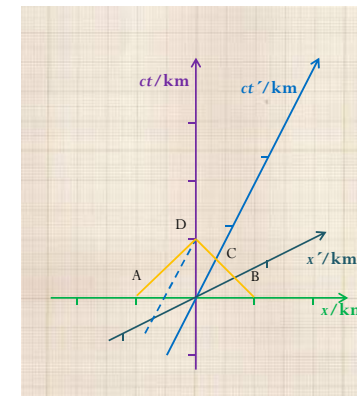


47

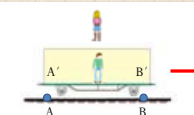
Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

Quais são os valores lidos nos eixos para o acontecimento D?

	x/km	ct/km
A	-1.00	0.00
B	1.00	0.00
C	0.35	0.65
D	0.00	1.00
E		



	x'/km	ct'/km
A	-1.20	0.60
B	1.20	-0.60
C	0.00	0.60
D	-0.60	
E		

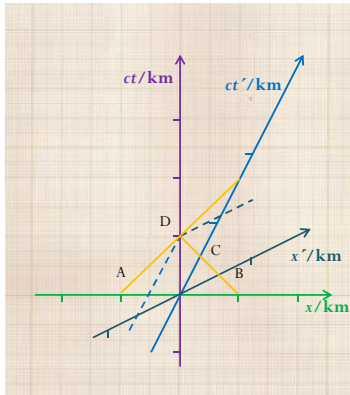


48

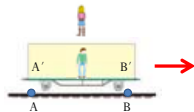
Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

Quais são os valores lidos nos eixos para o acontecimento D?

	x/km	ct/km
A	-1.00	0.00
B	1.00	0.00
C	0.35	0.65
D	0.00	1.00
E		



	x'/km	ct'/km
A	-1.20	0.60
B	1.20	-0.60
C	0.00	0.60
D	-0.60	1.20
E		

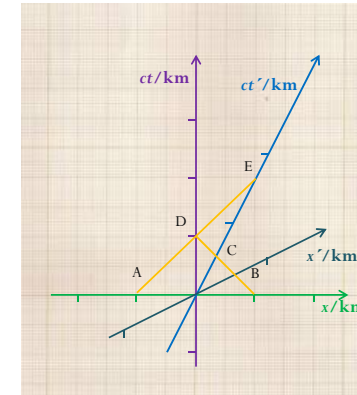


49

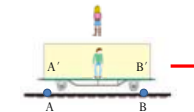
Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

Quais são os valores lidos nos eixos para o acontecimento E?

	x/km	ct/km
A	-1.00	0.00
B	1.00	0.00
C	0.35	0.65
D	0.00	1.00
E		



	x'/km	ct'/km
A	-1.20	0.60
B	1.20	-0.60
C	0.00	0.60
D	-0.60	1.20
E		

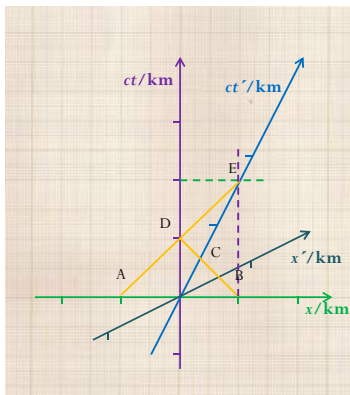


50

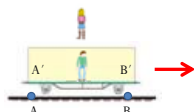
Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

Quais são os valores lidos nos eixos para o acontecimento E?

	x/km	ct/km
A	-1.00	0.00
B	1.00	0.00
C	0.35	0.65
D	0.00	1.00
E	1.00	2.00



	x'/km	ct'/km
A	-1.20	0.60
B	1.20	-0.60
C	0.00	0.60
D	-0.60	1.20
E		

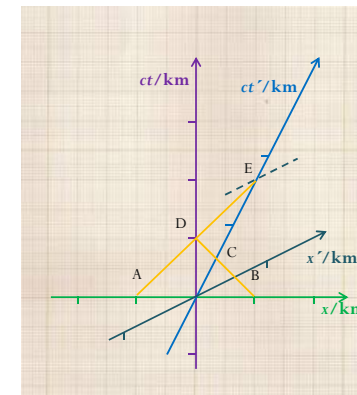


51

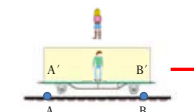
Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

Quais são os valores lidos nos eixos para o acontecimento E?

	x/km	ct/km
A	-1.00	0.00
B	1.00	0.00
C	0.35	0.65
D	0.00	1.00
E	1.00	2.00



	x'/km	ct'/km
A	-1.20	0.60
B	1.20	-0.60
C	0.00	0.60
D	-0.60	1.20
E	0.00	1.70

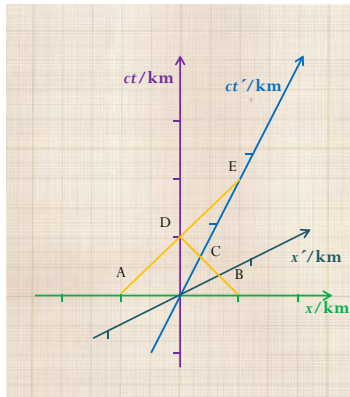


52

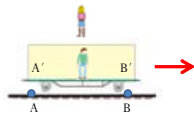
Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

Quais são os valores lidos nos eixos para os acontecimentos A, B, C, D e E?

	x/km	ct/km
A	-1.00	0.00
B	1.00	0.00
C	0.35	0.65
D	0.00	1.00
E	1.00	2.00



	x'/km	ct'/km
A	-1.20	0.60
B	1.20	-0.60
C	0.00	0.60
D	-0.60	1.20
E	0.00	1.70



53

Podemos concluir que:

- Podemos desenhar um diagrama de espaço-tempo com eixos da posição e do tempo para vários referenciais, desde que se mantenha a condição do intervalo de espaço-tempo invariante.
- Os eixos dos tempos e das posições dependem dos referenciais.
- Dois acontecimentos simultâneos num referencial, podem não ser simultâneos noutra referencial.

54

Abordagem da Dilatação do Tempo

Teoria da Relatividade Restrita

Dilatação do Tempo



2

<http://astropt.org/blog/2009/01/31/teoria-da-relatividade-dilatacao-do-tempo/>

Qual é o significado de dilatação do tempo?

Como varia o tempo medido num referencial em relação ao tempo medido noutro referencial?

Referenciais

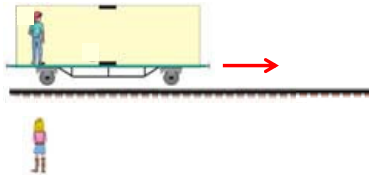
- Um referencial de inércia fixo na Terra.
- Um referencial de inércia fixo numa carruagem que se movimenta relativamente ao solo com velocidade $c/2$.



4

Referenciais

- Um referencial de inércia fixo na Terra.
- Um referencial de inércia fixo numa carruagem que se movimenta relativamente ao solo com velocidade $c/2$.

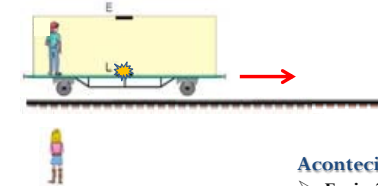
**Observadores**

- Alice, observadora ligada ao referencial fixo na Terra.
- David, observador ligado ao referencial fixo na carruagem.

5

Referenciais

- Um referencial de inércia fixo na Terra.
- Um referencial de inércia fixo numa carruagem que se movimenta relativamente ao solo com velocidade $c/2$.

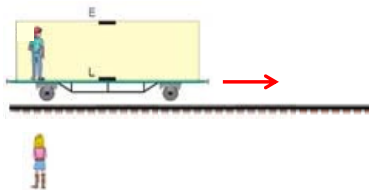
**Observadores**

- Alice, observadora ligada ao referencial fixo na Terra.
- David, observador ligado ao referencial fixo na carruagem.

Acontecimentos

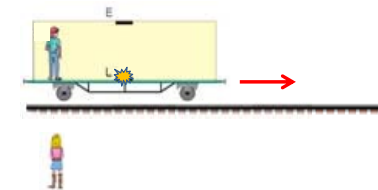
- Emissão de um sinal luminoso pela lâmpada L na direção do espelho E, quando a Alice e o David passam um pelo outro.
- Reflexão do sinal luminoso no espelho E e regresso à lâmpada L.

6

O que vê a Alice?

A Alice vê o David movendo-se para a direita com velocidade $c/2$

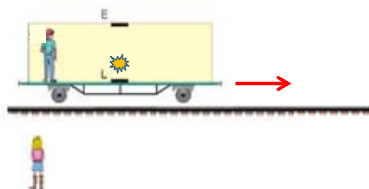
7

O que vê a Alice?

Quando o David passa pela Alice, uma lâmpada L fixa no chão da carruagem emite um sinal luminoso para o espelho E fixo no teto da carruagem.

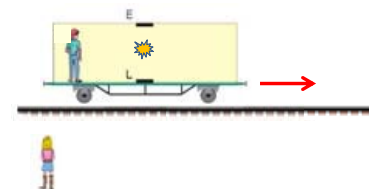
8

O que vê a Alice?



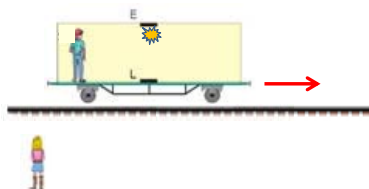
9

O que vê a Alice?



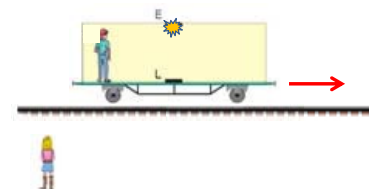
10

O que vê a Alice?



11

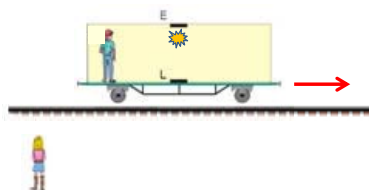
O que vê a Alice?



O sinal luminoso atinge o espelho E e é refletido.

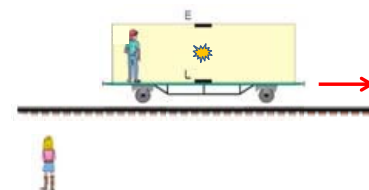
12

O que vê a Alice?



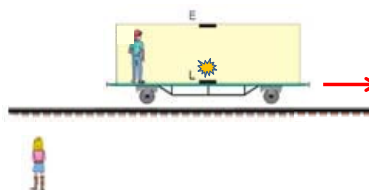
13

O que vê a Alice?



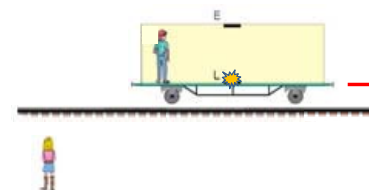
14

O que vê a Alice?



15

O que vê a Alice?



O sinal luminoso regressa à lâmpada L.

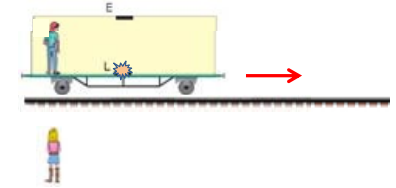
16

Em resumo ...

17

O que vê a Alice?

O David movendo-se para a direita.
A lâmpada L emite um sinal luminoso.

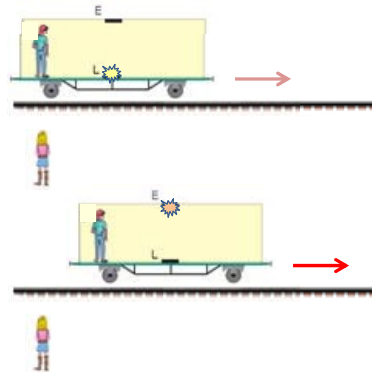


18

O que vê a Alice?

O David movendo-se para a direita.
A lâmpada L emite um sinal luminoso.

O sinal luminoso atinge espelho E e é refletido.



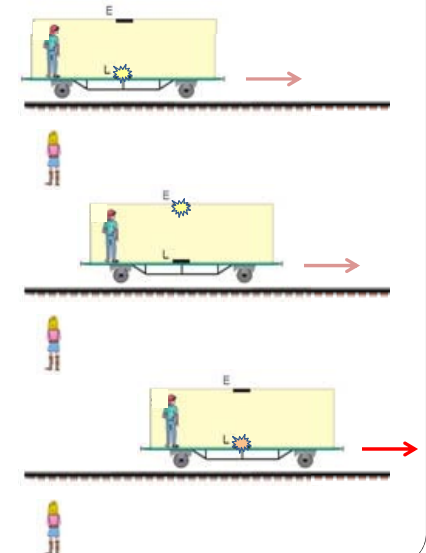
19

O que vê a Alice?

O David movendo-se para a direita.
A lâmpada L emite um sinal luminoso.

O sinal luminoso atinge espelho E e é refletido.

O sinal luminoso regressa à lâmpada L.

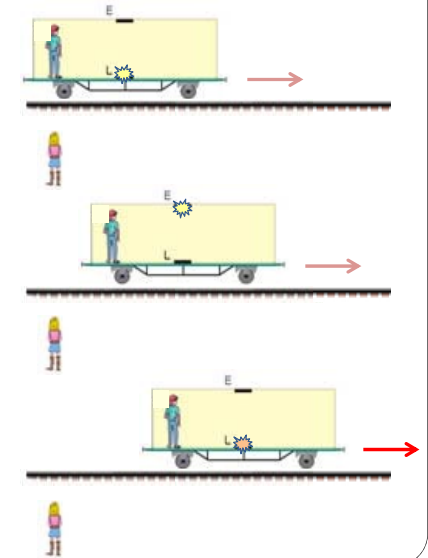


20

Como vê a Alice a trajetória do sinal luminoso?

21

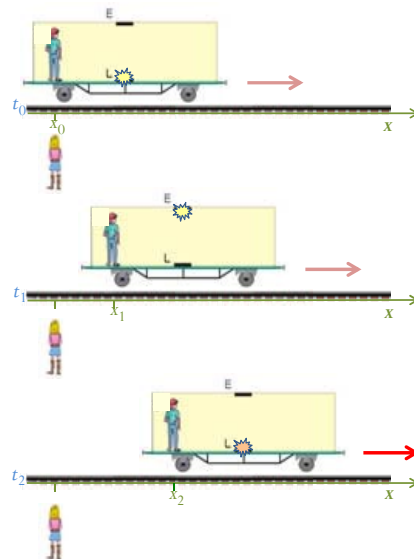
Como vê a Alice a trajetória do sinal luminoso?



22

Como vê a Alice a trajetória do sinal luminoso?

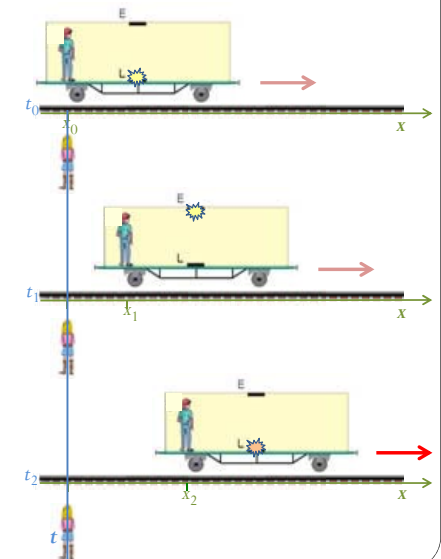
Podemos acrescentar um eixo de referência ao referencial Terra, em que a origem das posições, x_0 , corresponde à posição em que a Alice e o David passam um pelo outro e se inicia a contagem dos tempos, t_0 .



23

Como vê a Alice a trajetória do sinal luminoso?

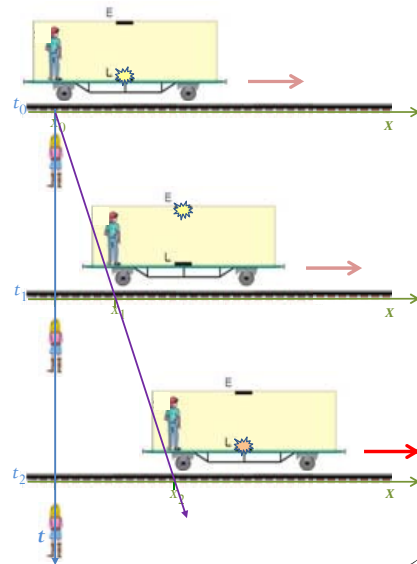
A Alice está parada (a sua posição não varia com o tempo), no referencial Terra.



24

Como vê a Alice a trajetória do sinal luminoso?

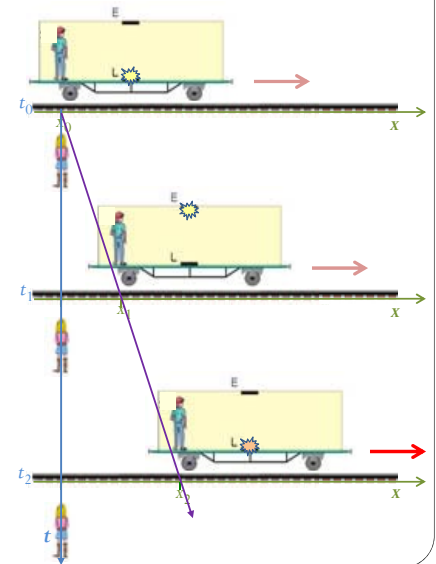
O David está em movimento (a sua posição varia com o tempo) em relação ao referencial Terra, com velocidade constante.



25

Como vê a Alice a trajetória do sinal luminoso?

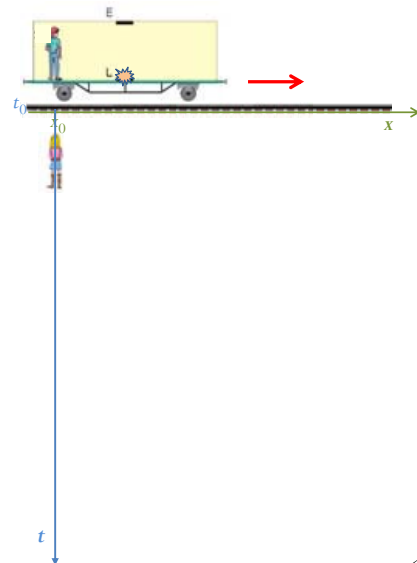
E o sinal luminoso?



26

Como vê a Alice a trajetória do sinal luminoso?

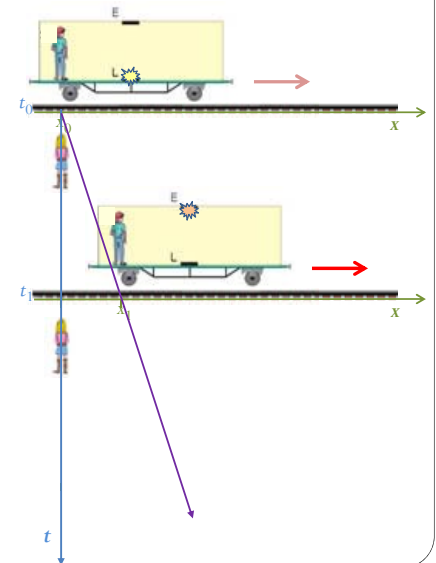
No instante t_0 (no referencial da Alice), a Alice vê o David passar e a lâmpada L emitir um sinal luminoso.



27

Como vê a Alice a trajetória do sinal luminoso?

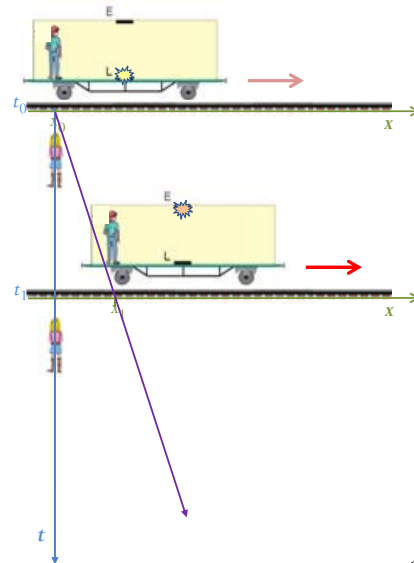
No instante t_1 (no referencial da Terra), a Alice vê o David afastar-se e o sinal luminoso atingir o espelho E.



28

Como vê a Alice a trajetória do sinal luminoso?

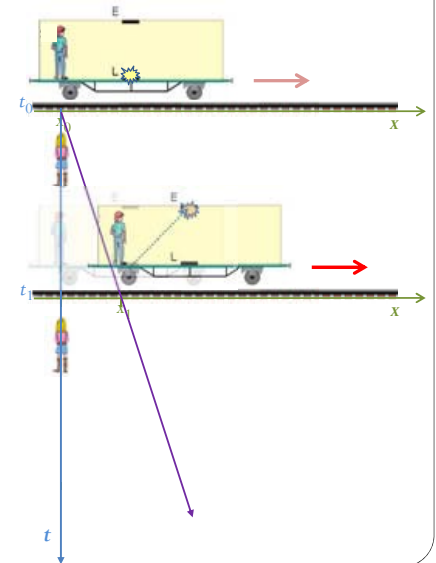
Qual é a trajetória do sinal luminoso?



29

Como vê a Alice a trajetória do sinal luminoso?

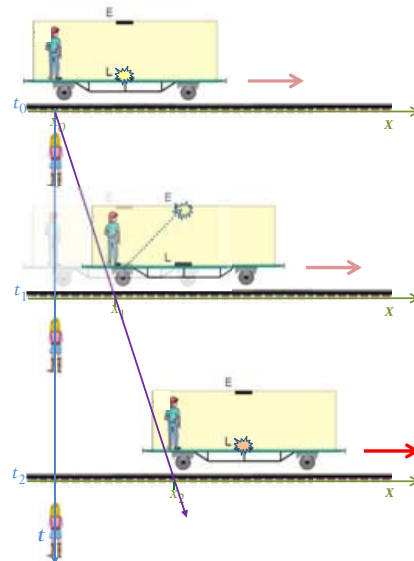
Qual é a trajetória do sinal luminoso?



30

Como vê a Alice a trajetória do sinal luminoso?

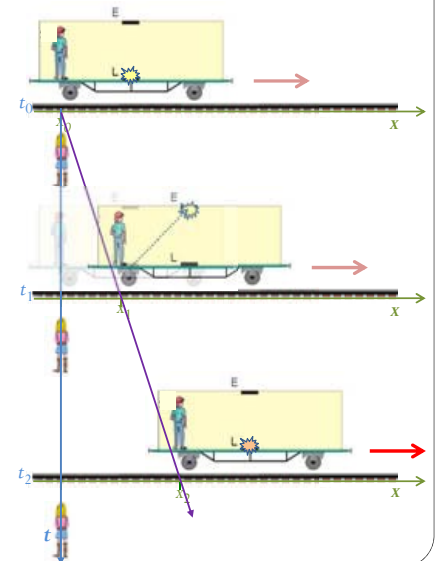
No instante t_2 (no referencial da Terra), a Alice vê o David afastar-se e o sinal luminoso regressar à lâmpada L.



31

Como vê a Alice a trajetória do sinal luminoso?

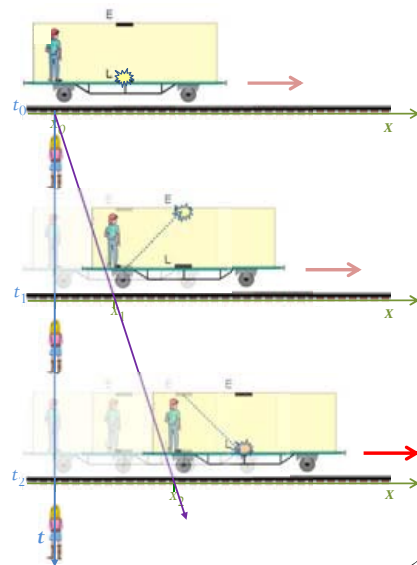
Qual é a trajetória do sinal luminoso?



32

Como vê a Alice a trajetória do sinal luminoso?

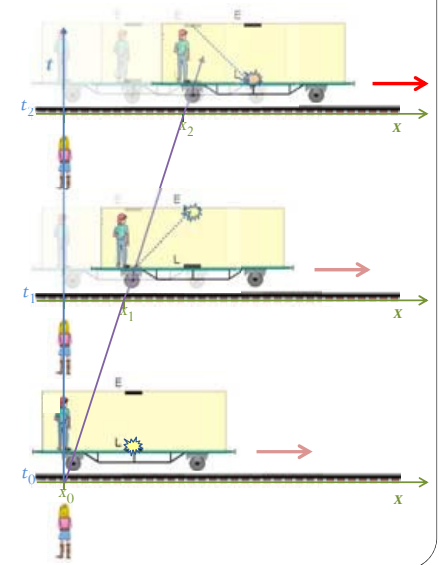
Qual é a trajetória do sinal luminoso?



33

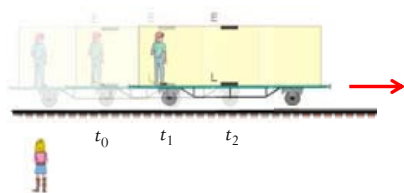
Como vê a Alice a trajetória do sinal luminoso?

Podemos colocar a sequência de imagens partindo de baixo para cima.



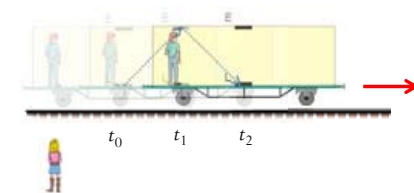
34

Como vê a Alice a trajetória do sinal luminoso?



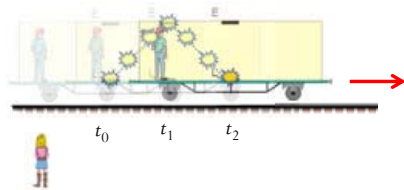
35

Como vê a Alice a trajetória do sinal luminoso?



36

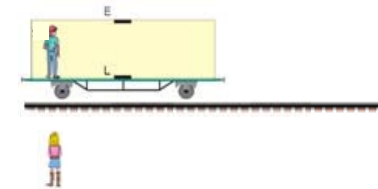
Como vê a Alice a trajetória do sinal luminoso?



A Alice vê o sinal luminoso a descrever uma trajetória retilínea e inclinada em relação à horizontal em cada um dos percursos antes e depois da reflexão no espelho E.

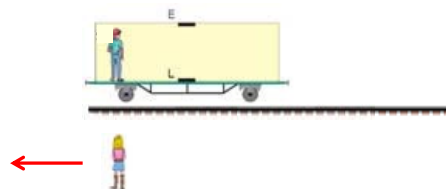
37

O que vê o David?



38

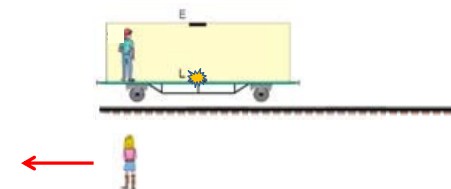
O que vê o David?



O David vê a Alice a movendo-se para a esquerda com uma velocidade $c/2$

39

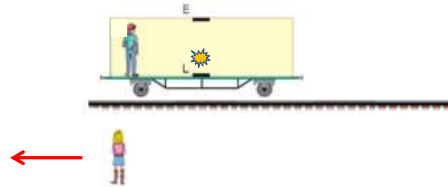
O que vê o David?



Quando a Alice passa pelo David, uma lâmpada L fixa no chão da carruagem emite um sinal luminoso para o espelho E fixo no teto da carruagem.

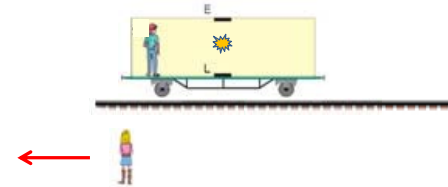
40

O que vê o David?



41

O que vê o David?



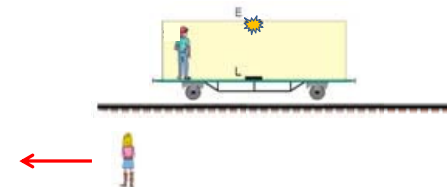
42

O que vê o David?



43

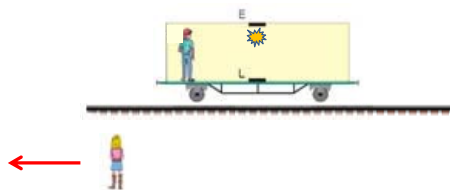
O que vê o David?



O sinal luminoso atinge o espelho E e é refletido.

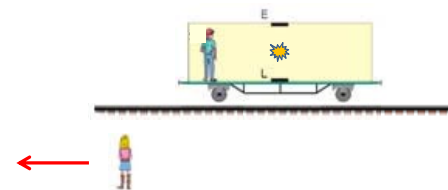
44

O que vê o David?



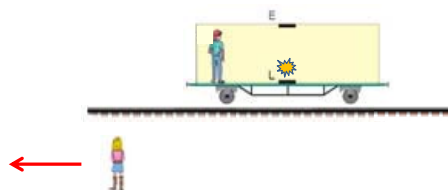
45

O que vê o David?



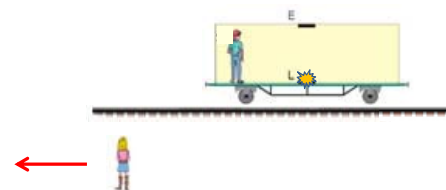
46

O que vê o David?



47

O que vê o David?



O sinal luminoso regressa à lâmpada L.

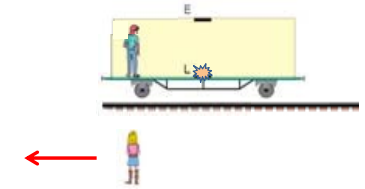
48

Em resumo ...

49

O que vê o David?

A Alice movendo-se para a esquerda.
A lâmpada L emite um sinal luminoso.

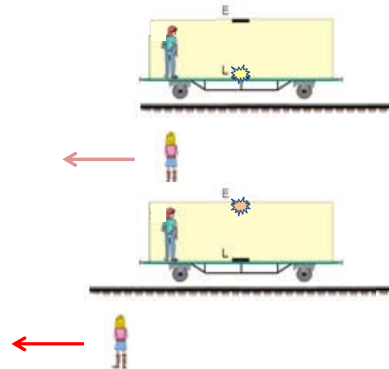


50

O que vê o David?

A Alice movendo-se para a esquerda.
A lâmpada L emite um sinal luminoso.

O sinal luminoso atinge espelho E e é refletido.



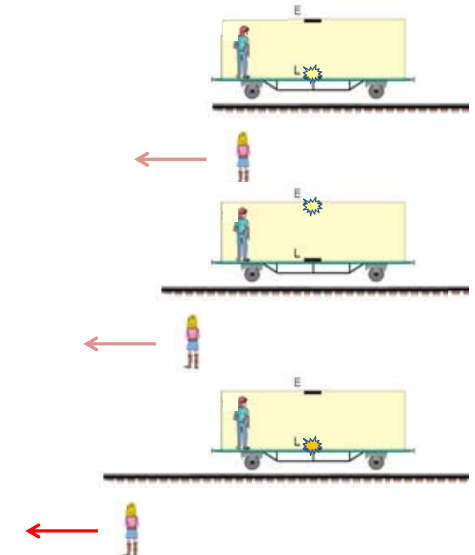
51

O que vê o David?

A Alice movendo-se para a esquerda.
A lâmpada L emite um sinal luminoso.

O sinal luminoso atinge espelho E e é refletido.

O sinal luminoso regressa à lâmpada L.

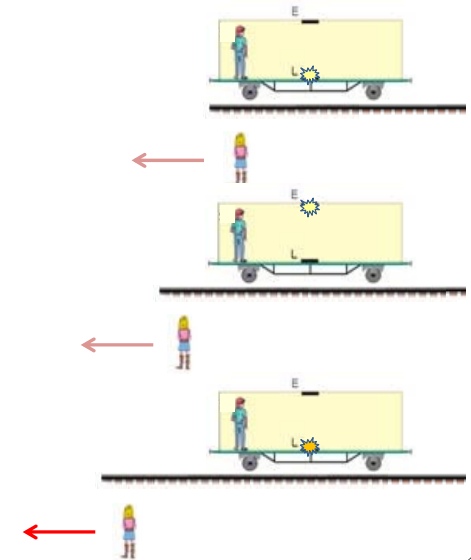


52

Como vê o David a trajetória do sinal luminoso?

53

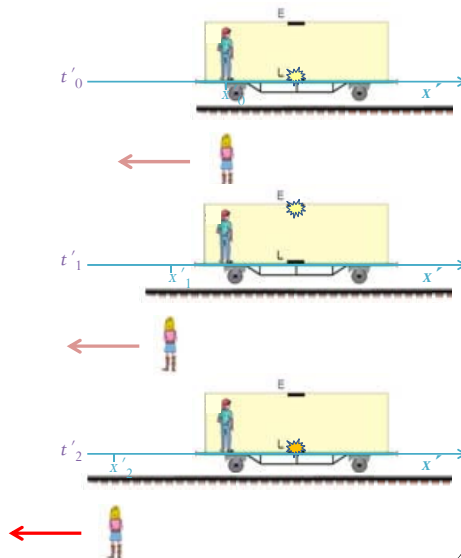
Como vê o David a trajetória do sinal luminoso?



54

Como vê o David a trajetória do sinal luminoso?

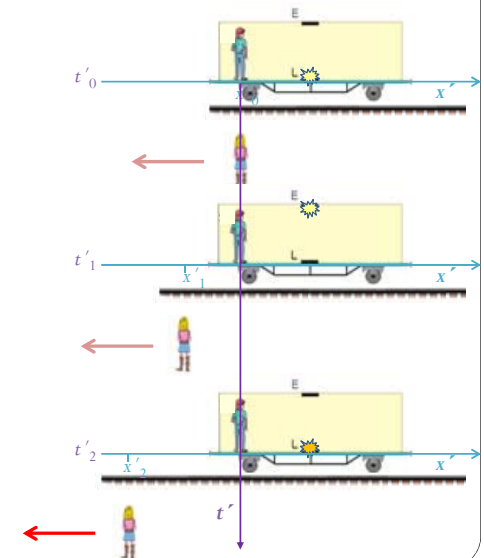
Podemos acrescentar um eixo de referência ao referencial Terra, em que a origem das posições, x'_0 , corresponde à posição em que a Alice e o David passam um pelo outro e se inicia a contagem dos tempos, t'_0 .



55

Como vê o David a trajetória do sinal luminoso?

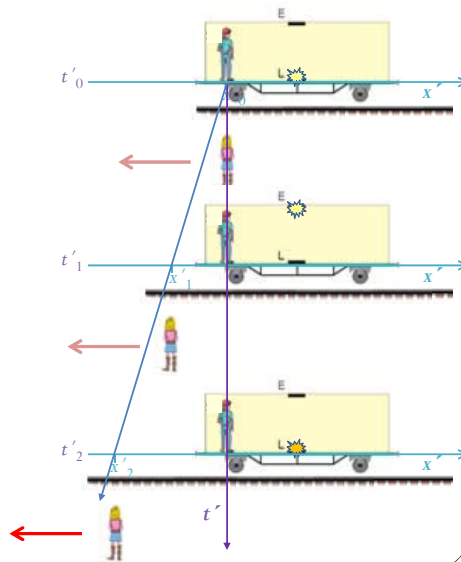
O David está parado (a sua posição não varia com o tempo), no referencial carruagem.



56

Como vê o David a trajetória do sinal luminoso?

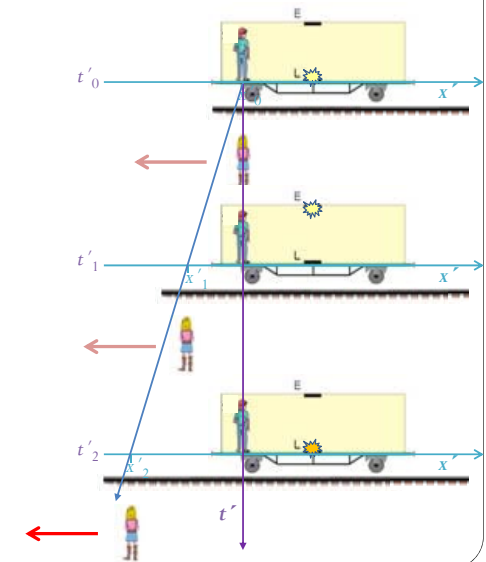
A Alice está em movimento (a sua posição varia com o tempo) em relação ao referencial carruagem, com velocidade constante.



57

Como vê o David a trajetória do sinal luminoso?

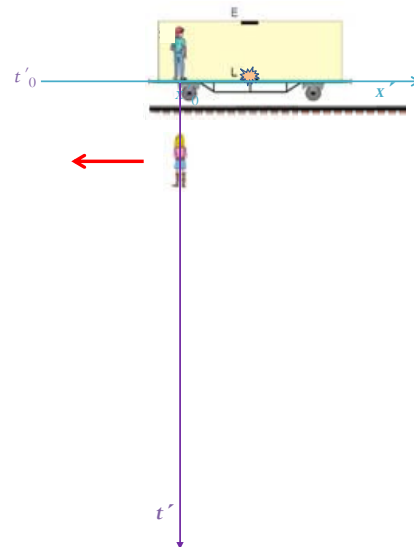
E o sinal luminoso?



58

Como vê o David a trajetória do sinal luminoso?

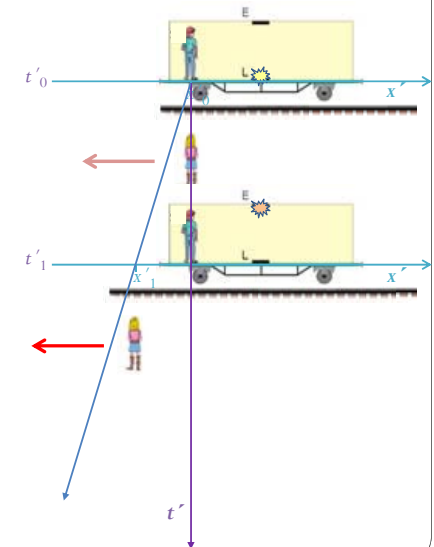
No instante t'_0 (no referencial carruagem), o David vê a Alice passar e a lâmpada L emitir um sinal luminoso.



59

Como vê o David a trajetória do sinal luminoso?

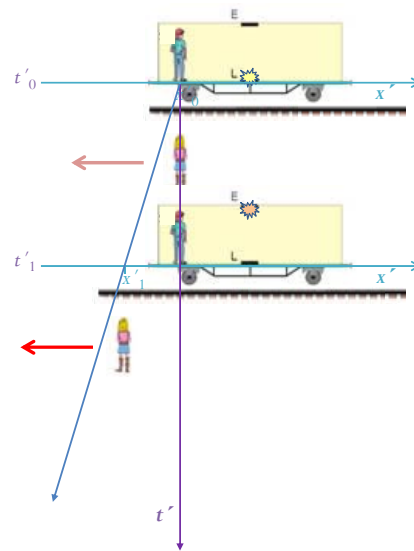
No instante t'_1 (no referencial carruagem), o David vê a Alice afastar-se e o sinal luminoso atingir o espelho E.



60

Como vê o David a trajetória do sinal luminoso?

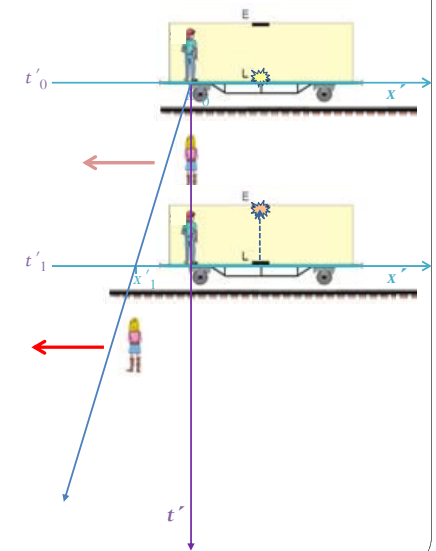
Qual é a trajetória do sinal luminoso?



61

Como vê o David a trajetória do sinal luminoso?

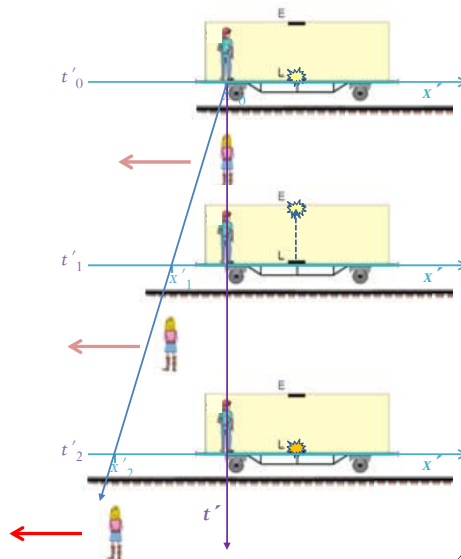
A trajetória é retilínea e vertical.



62

Como vê o David a trajetória do sinal luminoso?

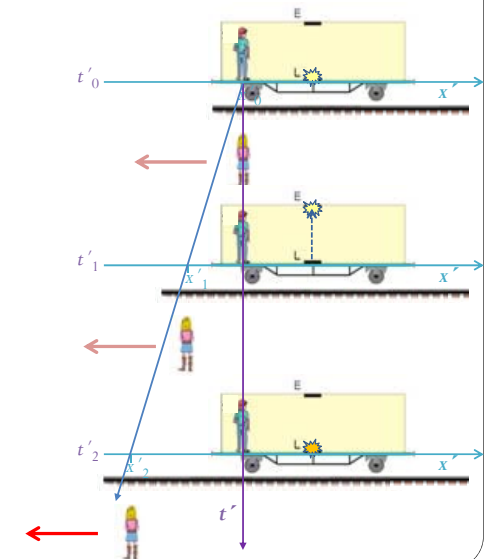
No instante t'_2 (no referencial carruagem), o David vê a Alice afastar-se e o sinal luminoso regressar à lâmpada L.



63

Como vê o David a trajetória do sinal luminoso?

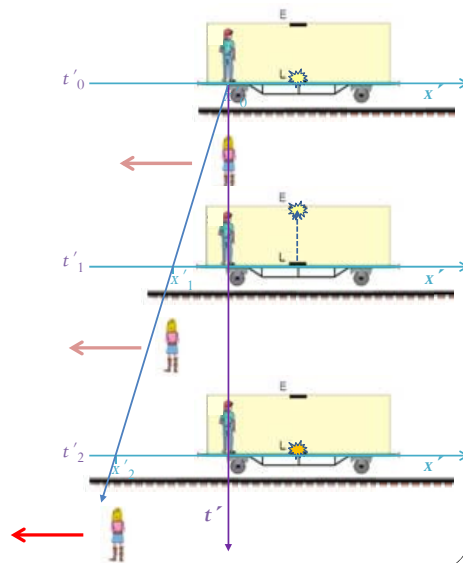
No instante t'_2 (no referencial carruagem), o David vê a Alice afastar-se e o sinal luminoso regressar à lâmpada L.



64

Como vê o David a trajetória do sinal luminoso?

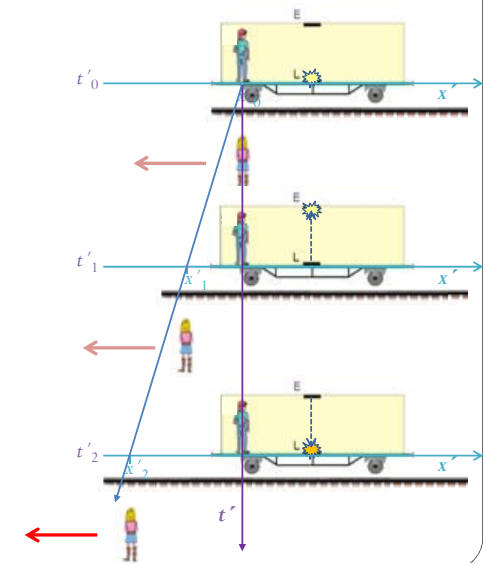
Qual é a trajetória do sinal luminoso?



65

Como vê o David a trajetória do sinal luminoso?

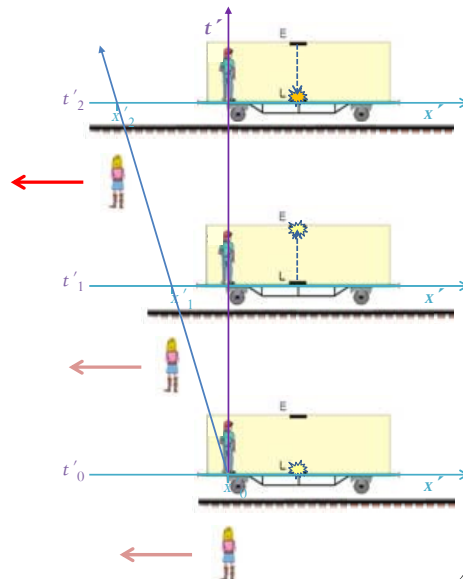
A trajetória é retilínea e vertical.



66

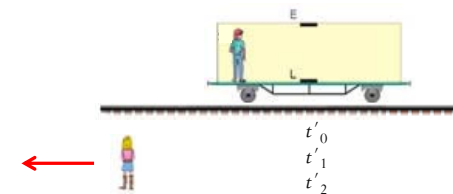
Como vê o David a trajetória do sinal luminoso?

Podemos colocar a sequência de imagens partindo de baixo para cima.



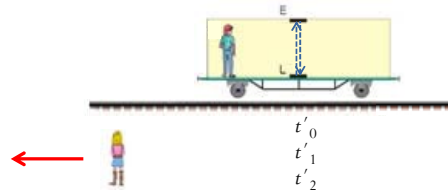
67

Como vê o David a trajetória do sinal luminoso?



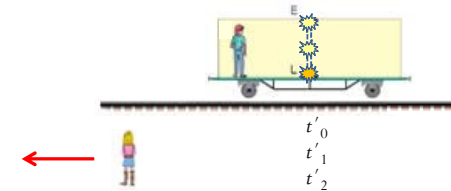
68

Como vê o David a trajetória do sinal luminoso?



69

Como vê o David a trajetória do sinal luminoso?



O David vê o sinal luminoso a descrever uma trajetória retilínea e vertical. Primeiro para cima e depois para baixo.

70

Podemos concluir que:

-
-
-

71

Podemos concluir que:

- O trajeto do sinal luminoso observado pela Alice é diferente do trajeto do sinal luminoso observado pelo David.
- A Alice vê o sinal luminoso descrever uma trajetória inclinada em relação à horizontal em cada um dos percursos antes e depois da reflexão no espelho E.
- O David vê o sinal luminoso descrever uma trajetória vertical. Primeiro para cima até ao espelho E e depois para baixo regressando à lâmpada L.

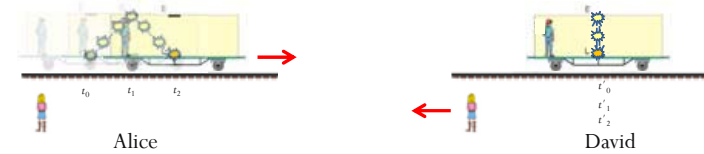
72

Mas a velocidade da luz é igual nos dois referenciais.

Quais são as implicações?

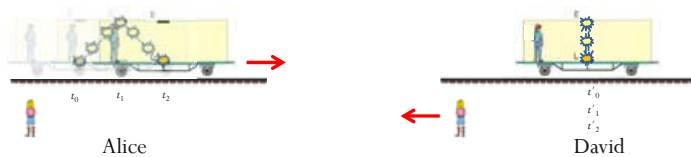
73

Quais são as implicações da velocidade da luz ser igual nos dois referenciais?



74

Quais são as implicações da velocidade da luz ser igual nos dois referenciais?



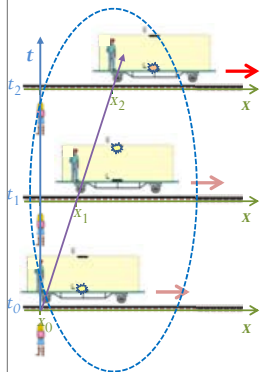
Para a Alice a distância percorrida pelo sinal luminoso é maior do que para o David. Como a velocidade da luz é a mesma para os dois, os intervalos de tempo medidos nos referenciais da Alice e do David também vão ser diferentes.

75

Existe alguma relação entre os tempos medidos pela Alice e pelo David?

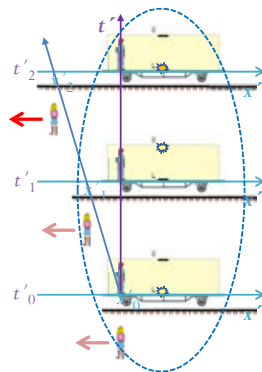
76

O que vê a Alice?

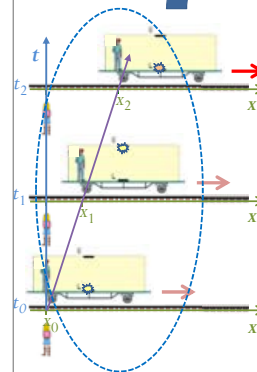


77

O que vê o David?

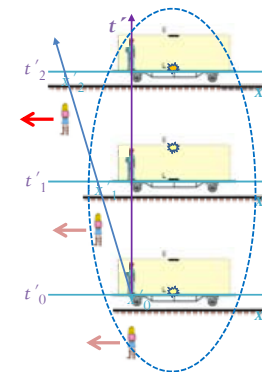


O que vê a Alice?

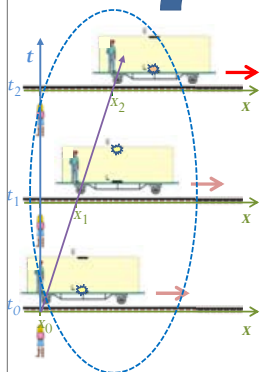


78

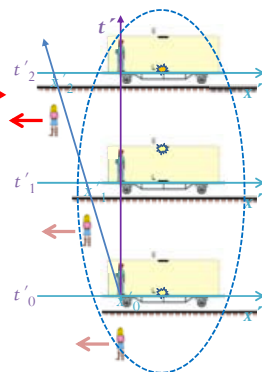
O que vê o David?



O que vê a Alice?

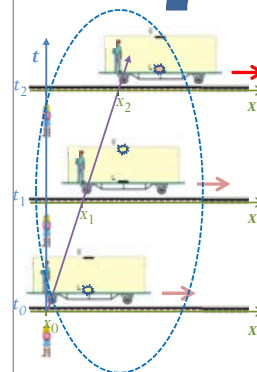


O que vê o David?



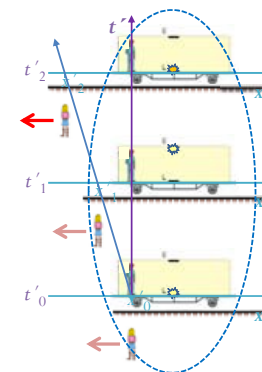
79

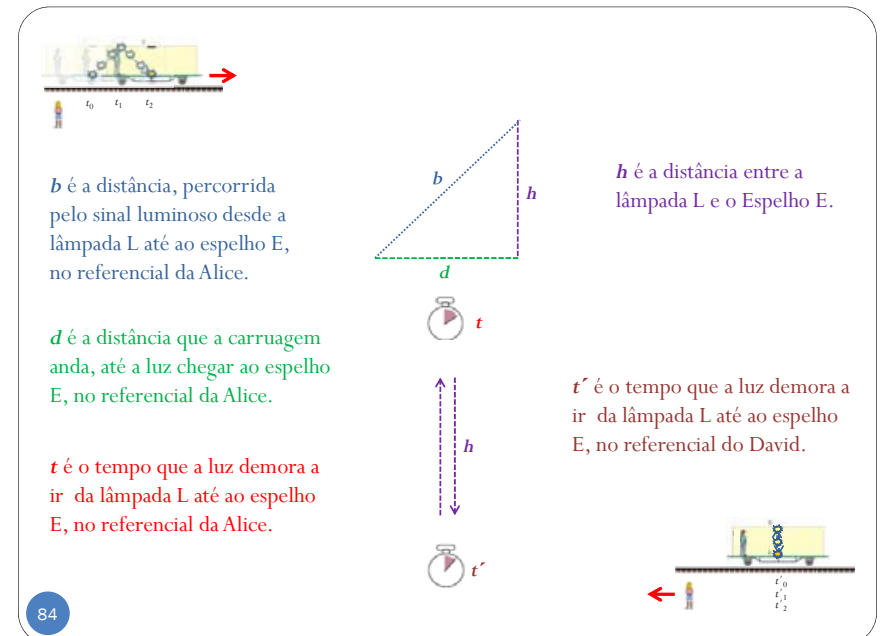
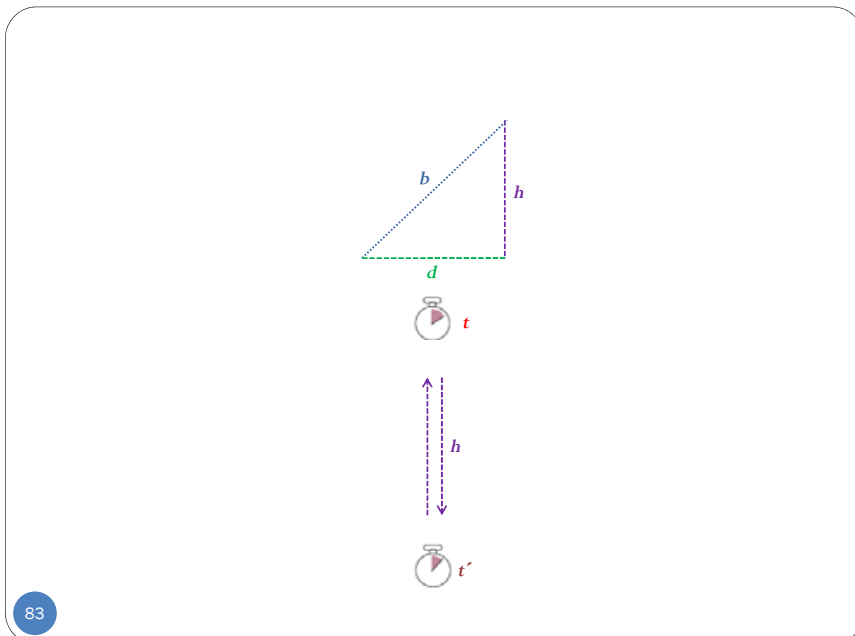
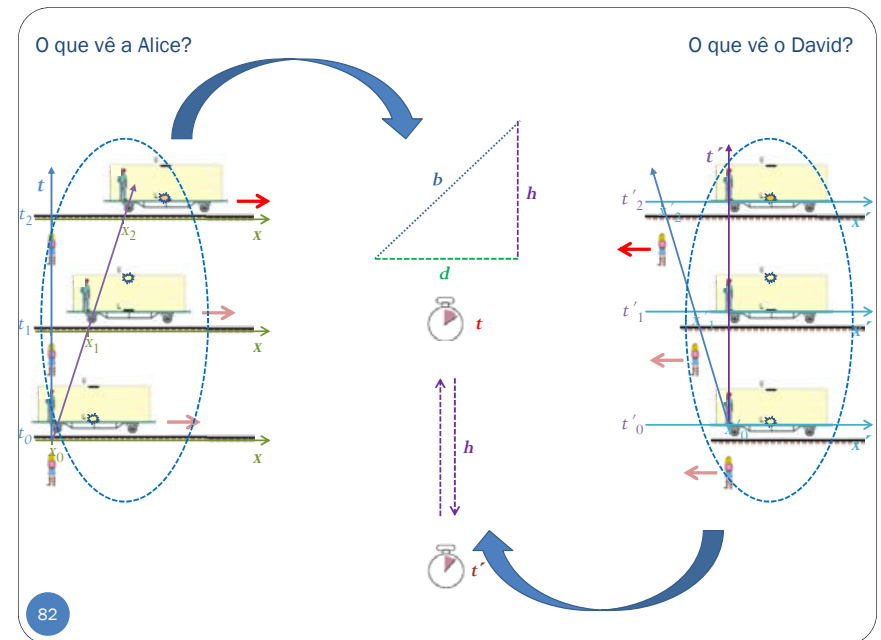
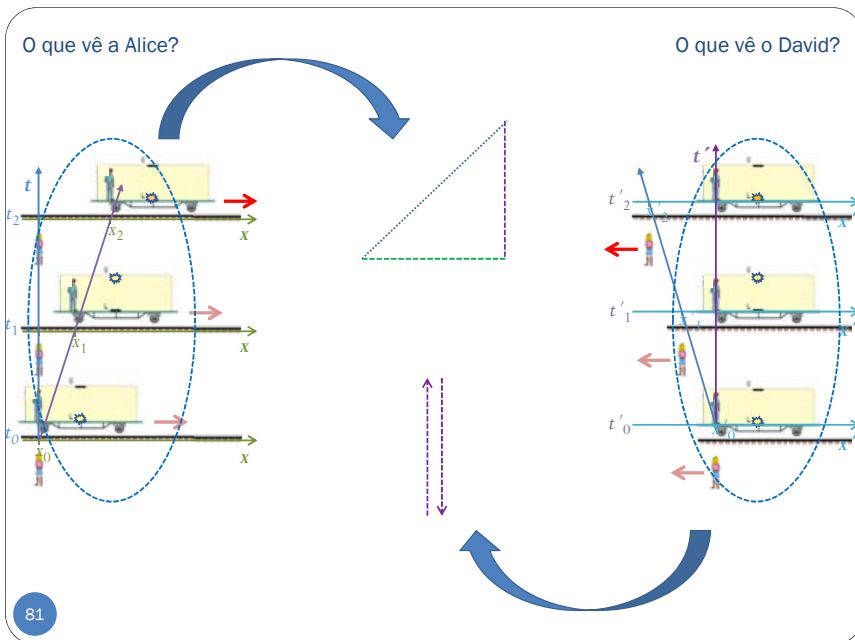
O que vê a Alice?

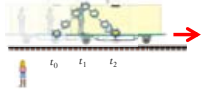


80

O que vê o David?



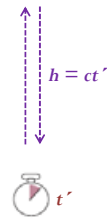
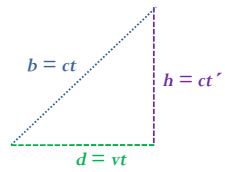




b é a distância, percorrida pelo sinal luminoso desde a lâmpada L até ao espelho E, no referencial da Alice.

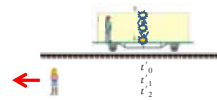
d é a distância que a carruagem anda, até a luz chegar ao espelho E, no referencial da Alice.

t é o tempo que a luz demora a ir da lâmpada L até ao espelho E, no referencial da Alice.

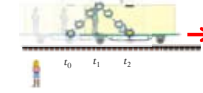


h é a distância entre a lâmpada L e o Espelho E.

t' é o tempo que a luz demora a ir da lâmpada L até ao espelho E, no referencial do David.

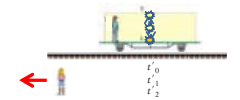
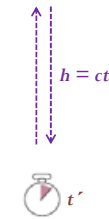
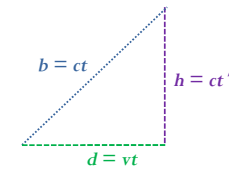


85

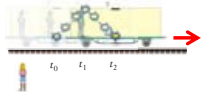


Aplicando o Teorema de Pitágoras

$$b^2 = d^2 + h^2$$



86

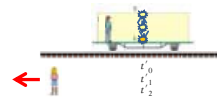
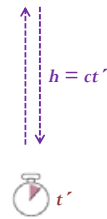
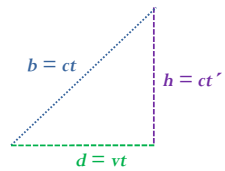


Aplicando o Teorema de Pitágoras

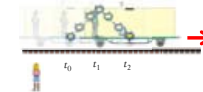
$$b^2 = d^2 + h^2$$

substituindo

$$(ct)^2 = (vt)^2 + (ct')^2$$



87

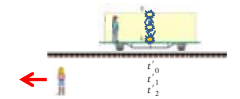
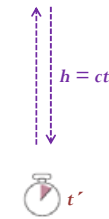
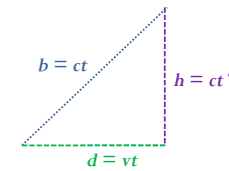


Aplicando o Teorema de Pitágoras

$$b^2 = d^2 + h^2$$

substituindo

$$(ct)^2 = (vt)^2 + (ct')^2$$



Simplificando, chegamos a uma equação que relaciona os dois tempos

$$t = \frac{t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

88

Simplificando ...

89

Aplicando o Teorema de Pitágoras

$$b^2 = d^2 + h^2$$

substituindo

$$(ct)^2 = (vt)^2 + (ct')^2$$

$$(ct)^2 - (vt)^2 = (ct')^2$$

$$(c^2 - v^2)t^2 = c^2 t'^2$$

$$t^2 = \frac{c^2 t'^2}{(c^2 - v^2)}$$

$$t = \sqrt{\frac{c^2 t'^2}{c^2 - v^2}}$$

$$t = t' \sqrt{\frac{\frac{c^2}{c^2}}{\frac{c^2 - v^2}{c^2}}}$$

$$t = t' \sqrt{\frac{1}{\frac{c^2 - v^2}{c^2}}}$$

90

Aplicando o Teorema de Pitágoras

$$b^2 = d^2 + h^2$$

substituindo

$$(ct)^2 = (vt)^2 + (ct')^2$$

$$(ct)^2 - (vt)^2 = (ct')^2$$

$$(c^2 - v^2)t^2 = c^2 t'^2$$

$$t^2 = \frac{c^2 t'^2}{(c^2 - v^2)}$$

$$t = \sqrt{\frac{c^2 t'^2}{c^2 - v^2}}$$

$$t = t' \sqrt{\frac{\frac{c^2}{c^2}}{\frac{c^2 - v^2}{c^2}}}$$

$$t = t' \sqrt{\frac{1}{\frac{c^2 - v^2}{c^2}}}$$

E chegamos à equação que relaciona os dois tempos, chamada **dilatação do tempo**

$$t = \frac{t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

91

Qual o significado da equação da dilatação do tempo?

$$t = \frac{t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

92

Qual é o significado da equação da dilatação do tempo?

t' é o tempo medido no referencial em repouso em relação ao acontecimento (*tempo próprio*).

$$t = \frac{t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

t é o tempo medido noutro referencial.

v velocidade de um referencial em relação ao outro.

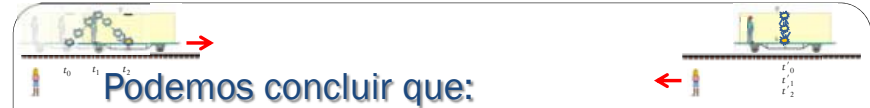
c velocidade da luz.

Para uma velocidade v igual a $c/2$

$$t = \frac{t'}{\sqrt{1 - \frac{c^2}{2^2 c^2}}} \Leftrightarrow t = \frac{t'}{\sqrt{1 - \frac{1}{2^2}}} \Leftrightarrow t = 1,155 \times t'$$

A expressão permite concluir que o *tempo próprio* é sempre menor que o tempo medido noutro referencial, que não o referencial em repouso em relação ao acontecimento.

93



Podemos concluir que:

- Os tempos medidos do acontecimento são diferentes, nos referenciais da Alice e do David.
- O tempo não é absoluto, é um conceito relativo.
- O referencial do David está em repouso em relação ao acontecimento, pelo que o tempo medido no referencial da Alice é superior (referencial que não está em repouso em relação ao acontecimento).
- Este fenómeno é conhecido por *dilatação do tempo*.
- A equação que relaciona os tempos t e t' é a *equação da dilatação do tempo*.

$$t = \frac{t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

94

Abordagem da Contração do Espaço

Teoria da Relatividade Restrita

Contração do Espaço



Qual é o significado de “contração do espaço”?

Como varia o comprimento de um corpo num referencial?

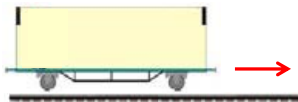


2



Referenciais

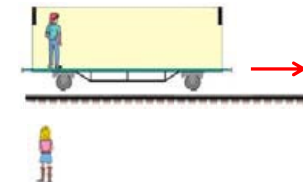
- Um referencial de inércia fixo na Terra.
- Um referencial de inércia fixo numa carruagem que se movimenta relativamente ao solo com velocidade $c/2$.



3

Referenciais

- Um referencial de inércia fixo na Terra.
- Um referencial de inércia fixo numa carruagem que se movimenta relativamente ao solo com velocidade $c/2$.



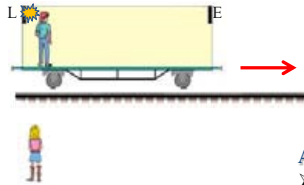
Observadores

- Alice, observadora ligada ao referencial fixo na Terra.
- David, observador ligado ao referencial fixo na carruagem.

4

Referenciais

- Um referencial de inércia fixo na Terra.
- Um referencial de inércia fixo numa carruagem que se movimenta relativamente ao solo com velocidade $c/2$.

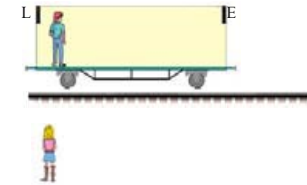
**Observadores**

- Alice, observadora ligada ao referencial fixo na Terra.
- David, observador ligado ao referencial fixo na carruagem.

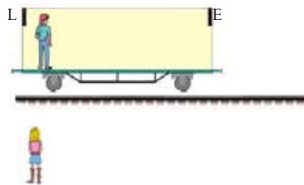
Acontecimentos

- Emissão de um sinal luminoso pela lâmpada L na direção do espelho E, quando a Alice e o David passam um pelo outro.
- Reflexão do sinal luminoso no espelho E e regresso à lâmpada L.

5

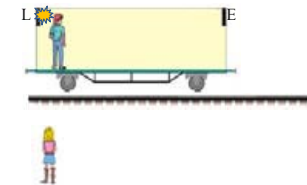
O que vê a Alice?

6

O que vê a Alice?

A Alice vê o David movendo-se para a direita com velocidade $c/2$

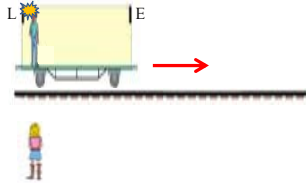
7

O que vê a Alice?

Quando o David passa pela Alice, uma lâmpada L fixa na parede da retaguarda da carruagem emite um sinal luminoso para o espelho E fixo na parede oposta da carruagem.

8

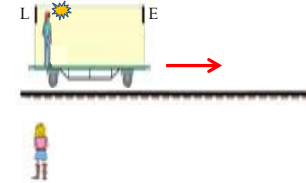
O que vê a Alice?



Vamos mostrar porque a Alice vê a carruagem mais “curta”.

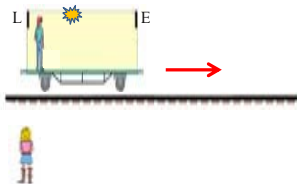
9

O que vê a Alice?



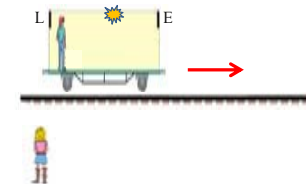
10

O que vê a Alice?



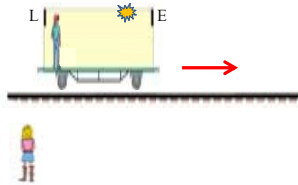
11

O que vê a Alice?



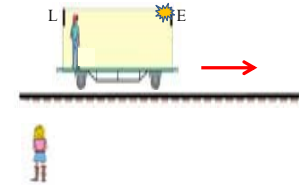
12

O que vê a Alice?



13

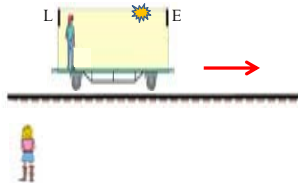
O que vê a Alice?



O sinal luminoso atinge o espelho E e é refletido.

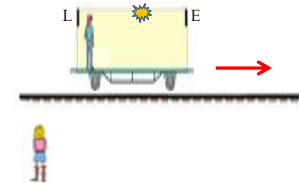
14

O que vê a Alice?



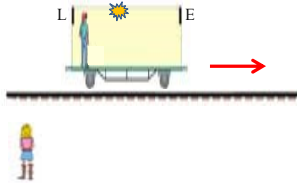
15

O que vê a Alice?



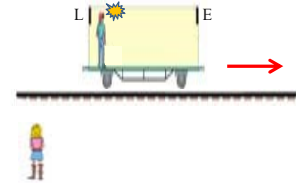
16

O que vê a Alice?



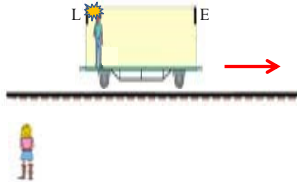
17

O que vê a Alice?



18

O que vê a Alice?



O sinal luminoso regressa à lâmpada L.

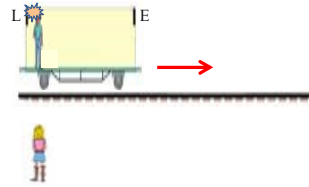
19

Em resumo ...

20

O que vê a Alice?

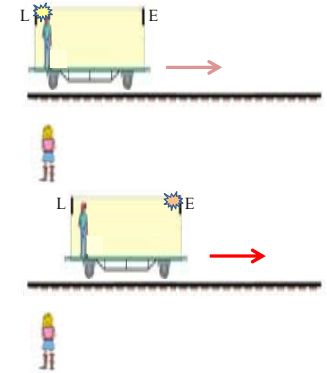
O David movendo-se para a direita.
A lâmpada L emite um sinal luminoso.
A carruagem mais curta.



21

O que vê a Alice?

O David movendo-se para a direita.
A lâmpada L emite um sinal luminoso.
A carruagem mais curta.

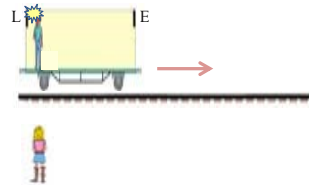


O sinal luminoso atinge espelho E e é refletido.

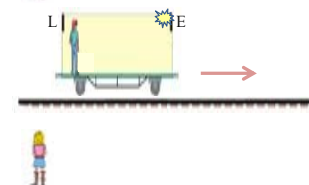
22

O que vê a Alice?

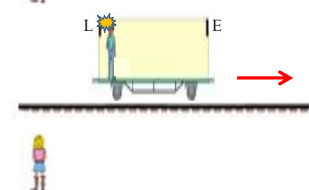
O David movendo-se para a direita.
A lâmpada L emite um sinal luminoso.
A carruagem mais curta.



O sinal luminoso atinge espelho E e é refletido.



O sinal luminoso regressa à lâmpada L.



23

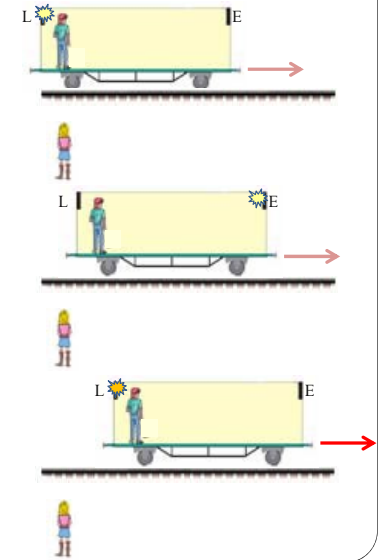
Como vê a Alice a trajetória do sinal luminoso?

24

Como vê a Alice a trajetória do sinal luminoso?

25

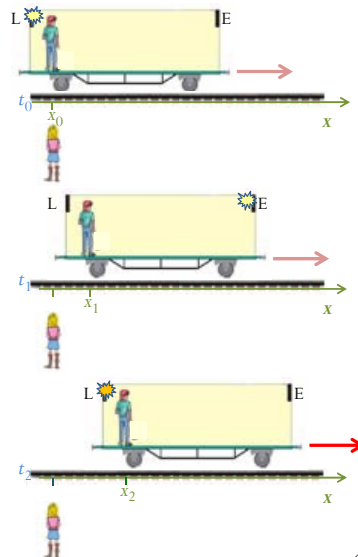
Como vê a Alice a trajetória do sinal luminoso?



26

Como vê a Alice a trajetória do sinal luminoso?

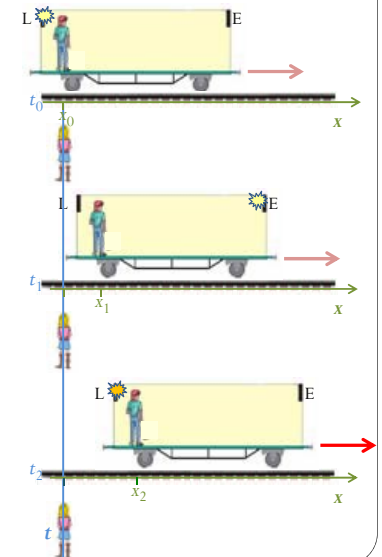
Podemos acrescentar um eixo de referência ao referencial Terra, em que a origem das posições, x_0 , corresponde à posição em que a Alice e o David passam um pelo outro e se inicia a contagem dos tempos, t_0 .



27

Como vê a Alice a trajetória do sinal luminoso?

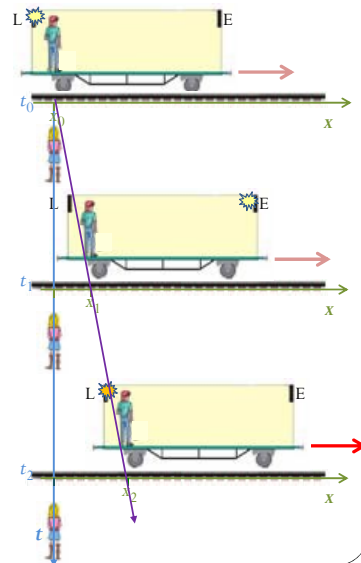
A Alice está parada (a sua posição não varia com o tempo), no referencial Terra.



28

Como vê a Alice a trajetória do sinal luminoso?

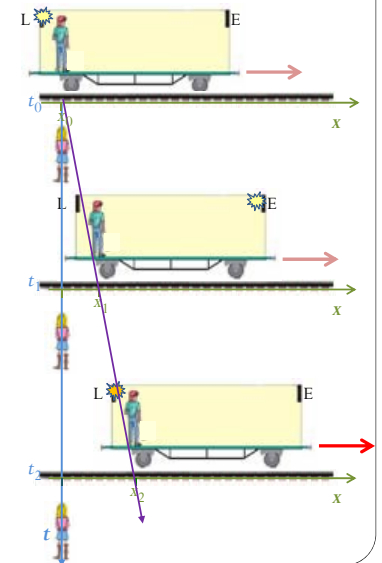
O David está em movimento (a sua posição varia com o tempo) em relação ao referencial Terra, com velocidade constante.



29

Como vê a Alice a trajetória do sinal luminoso?

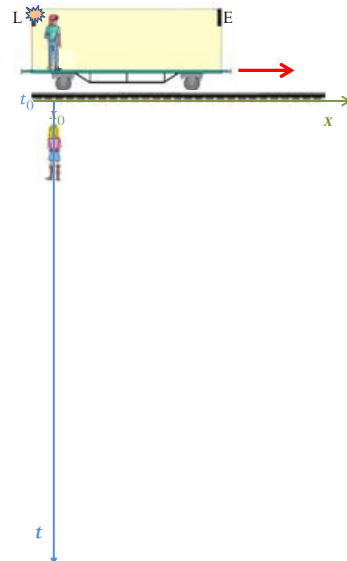
E o sinal luminoso?



30

Como vê a Alice a trajetória do sinal luminoso?

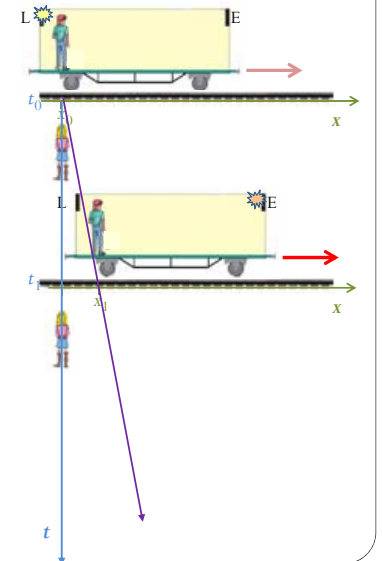
No instante t_0 (no referencial da Alice), a Alice vê o David passar e a lâmpada L emitir um sinal luminoso.



31

Como vê a Alice a trajetória do sinal luminoso?

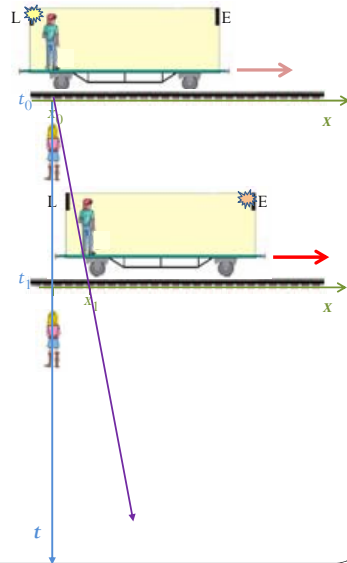
No instante t_1 (no referencial da Terra), a Alice vê o David afastar-se e o sinal luminoso atingir o espelho E.



32

Como vê a Alice a trajetória do sinal luminoso?

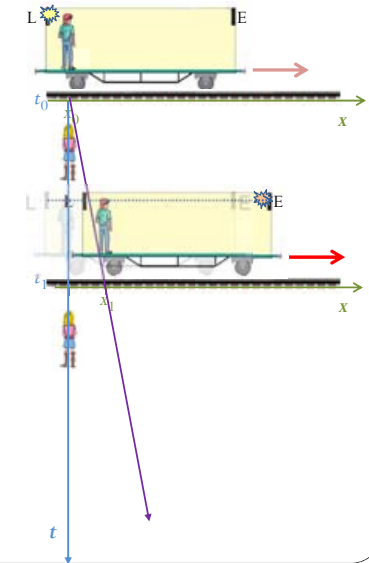
Qual é a trajetória do sinal luminoso?



33

Como vê a Alice a trajetória do sinal luminoso?

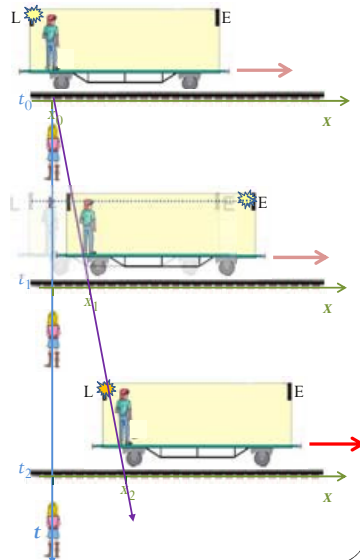
Qual é a trajetória do sinal luminoso?



34

Como vê a Alice a trajetória do sinal luminoso?

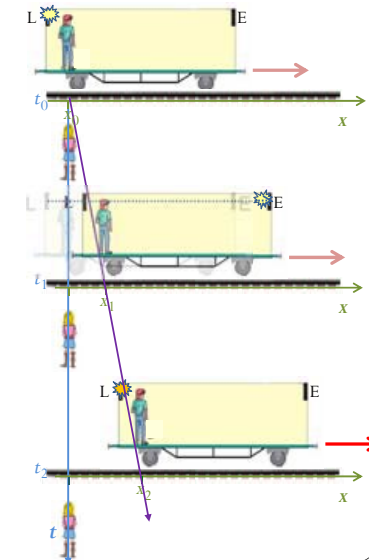
No instante t_2 (no referencial da Terra), a Alice vê o David afastar-se e o sinal luminoso regressar à lâmpada L.



35

Como vê a Alice a trajetória do sinal luminoso?

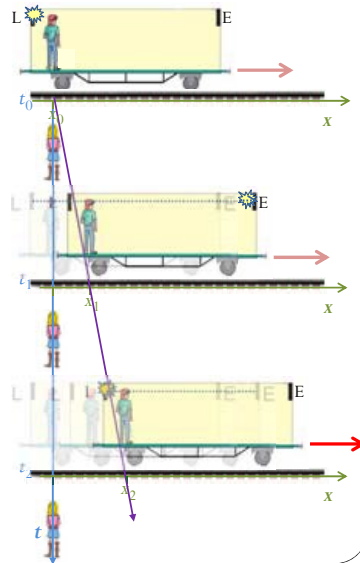
Qual é a trajetória do sinal luminoso?



36

Como vê a Alice a trajetória do sinal luminoso?

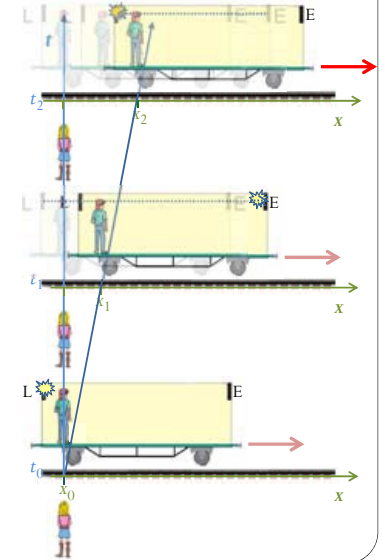
Qual é a trajetória do sinal luminoso?



37

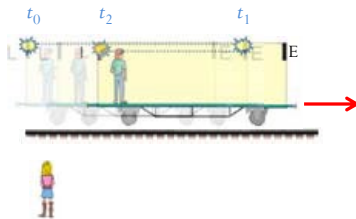
Como vê a Alice a trajetória do sinal luminoso?

Podemos colocar a sequência de imagens partindo de baixo para cima.



38

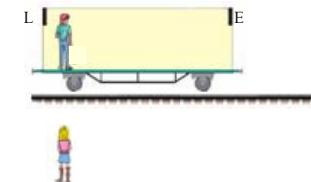
Como vê a Alice a trajetória do sinal luminoso?



A Alice vê o sinal luminoso descrever a trajetória representada no esquema acima.

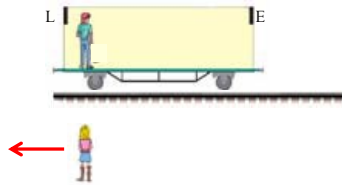
39

O que vê o David?



40

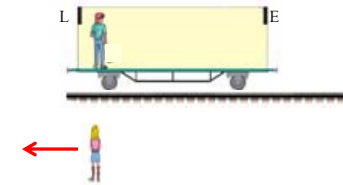
O que vê o David?



O David vê a Alice movendo-se para a esquerda com uma velocidade $c/2$

41

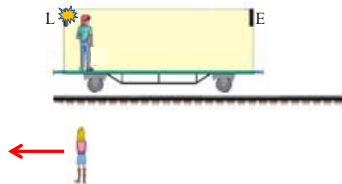
O que vê o David?



O David vê a Alice mais “estrita”.

42

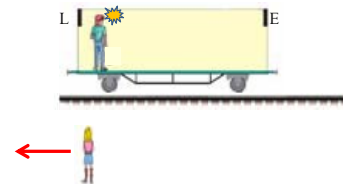
O que vê o David?



Quando a Alice passa pelo David, uma lâmpada L fixa na parede da retaguarda da carruagem emite um sinal luminoso para o espelho E fixo na parede oposta da carruagem.

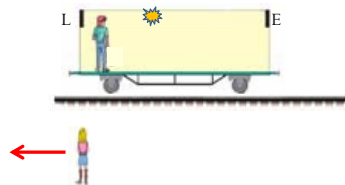
43

O que vê o David?



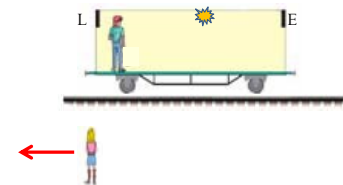
44

O que vê o David?



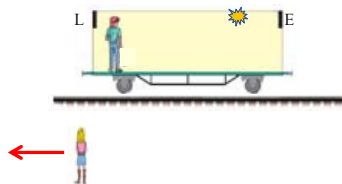
45

O que vê o David?



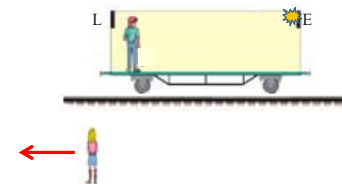
46

O que vê o David?



47

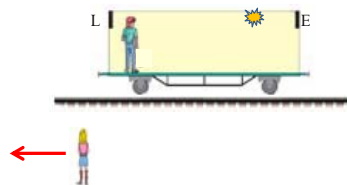
O que vê o David?



O sinal luminoso atinge o espelho E e é refletido.

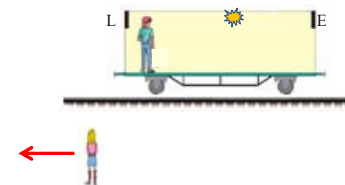
48

O que vê o David?



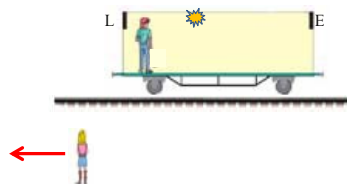
49

O que vê o David?



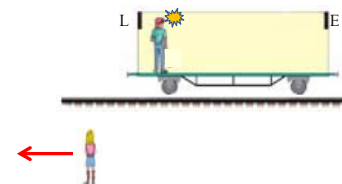
50

O que vê o David?



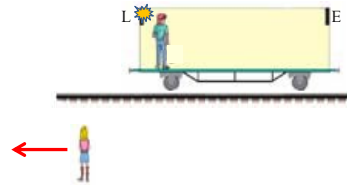
51

O que vê o David?



52

O que vê o David?



O sinal luminoso regressa à lâmpada L.

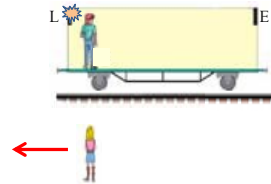
53

Em resumo ...

54

O que vê o David?

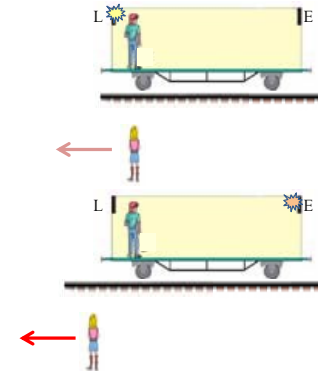
A Alice movendo-se para a esquerda.
A lâmpada L emite um sinal luminoso.
A Alice mais estreita.



55

O que vê o David?

A Alice movendo-se para a esquerda.
A lâmpada L emite um sinal luminoso.
A Alice mais estreita.



O sinal luminoso atinge espelho E e é refletido.

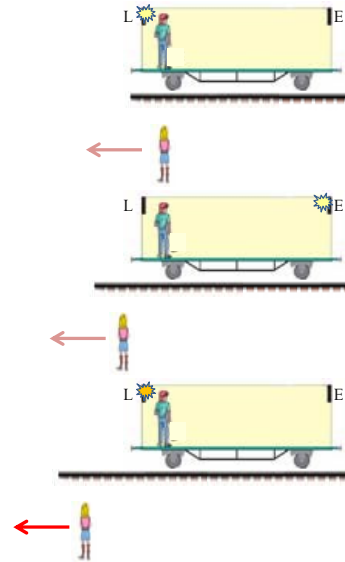
56

O que vê o David?

A Alice movendo-se para a esquerda.
A lâmpada L emite um sinal luminoso.
A Alice mais estreita.

O sinal luminoso atinge espelho E e é refletido.

O sinal luminoso regressa à lâmpada L.

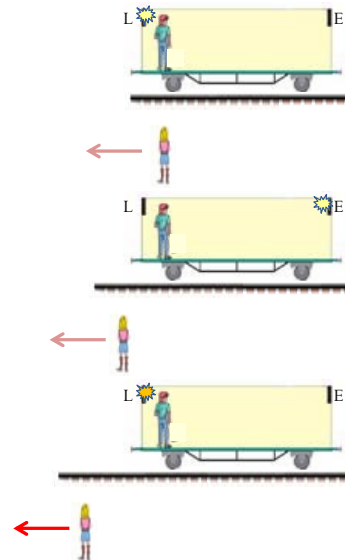


57

Como vê o David a trajetória do sinal luminoso?

58

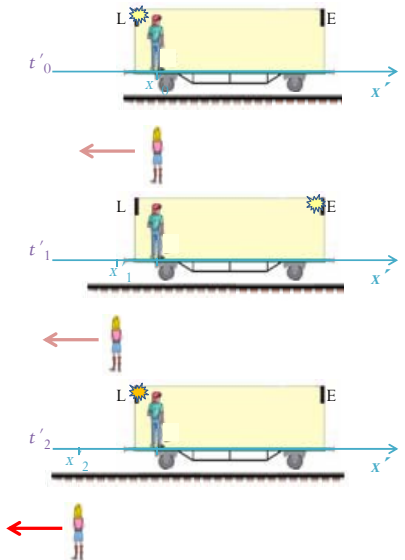
Como vê o David a trajetória do sinal luminoso?



59

Como vê o David a trajetória do sinal luminoso?

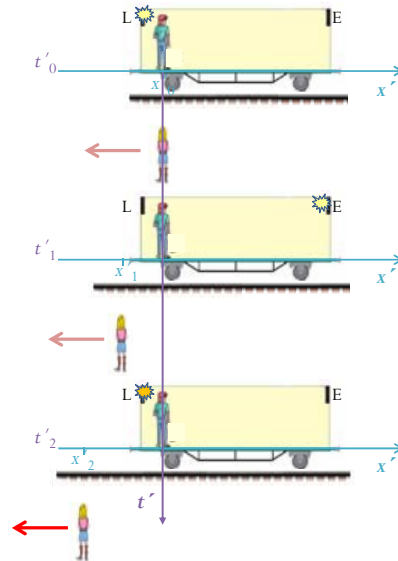
Podemos acrescentar um eixo de referência ao referencial Terra, em que a origem das posições, x'_0 , corresponde à posição em que a Alice e o David passam um pelo outro e se inicia a contagem dos tempos, t'_0 .



60

Como vê o David a trajetória do sinal luminoso?

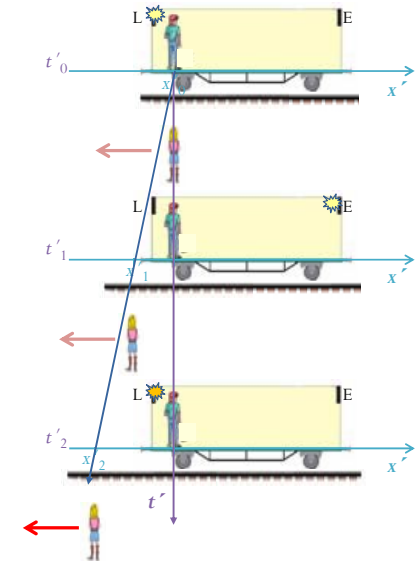
O David está parado (a sua posição não varia com o tempo), no referencial carruagem.



61

Como vê o David a trajetória do sinal luminoso?

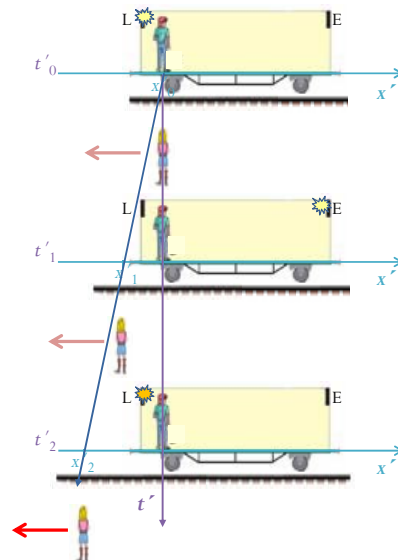
A Alice está em movimento (a sua posição varia com o tempo) em relação ao referencial carruagem, com velocidade constante.



62

Como vê o David a trajetória do sinal luminoso?

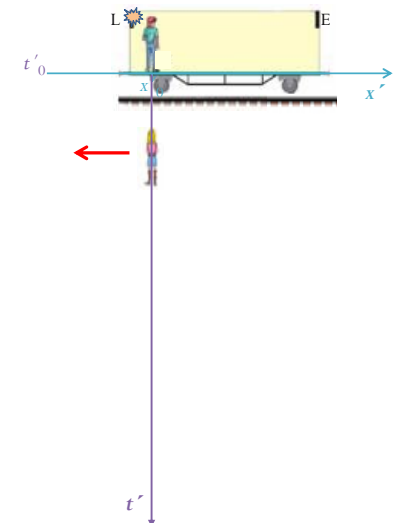
E o sinal luminoso?



63

Como vê o David a trajetória do sinal luminoso?

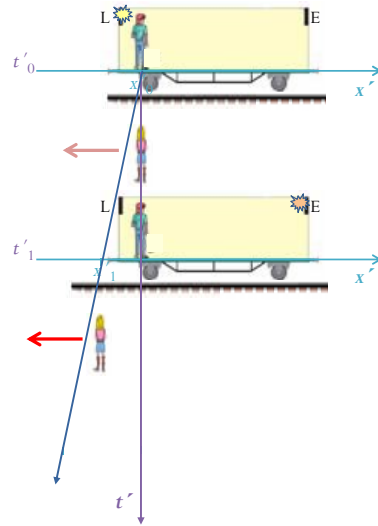
No instante t'_0 (no referencial carruagem), o David vê a Alice passar e a lâmpada L emitir um sinal luminoso.



64

Como vê o David a trajetória do sinal luminoso?

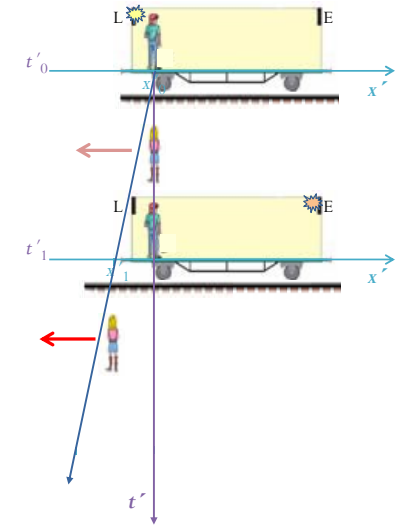
No instante t'_1 (no referencial carruagem), o David vê a Alice afastar-se e o sinal luminoso atingir o espelho E.



65

Como vê o David a trajetória do sinal luminoso?

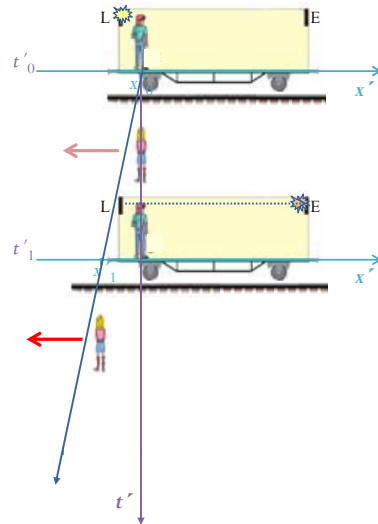
Qual é a trajetória do sinal luminoso?



66

Como vê o David a trajetória do sinal luminoso?

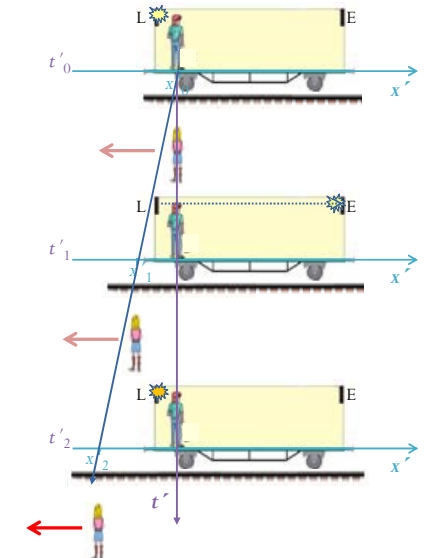
Qual é a trajetória do sinal luminoso?



67

Como vê o David a trajetória do sinal luminoso?

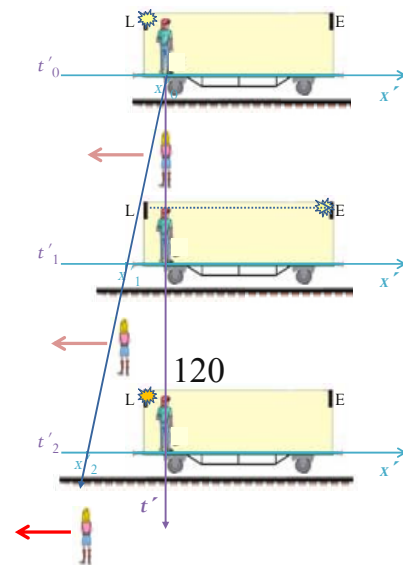
No instante t'_2 (no referencial carruagem), o David vê a Alice afastar-se e o sinal luminoso regressar à lâmpada L.



68

Como vê o David a trajetória do sinal luminoso?

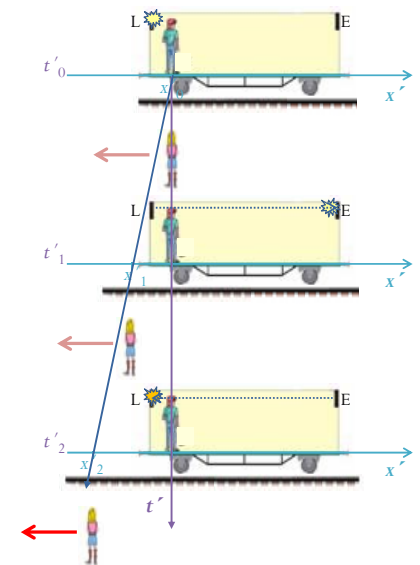
Qual é a trajetória do sinal luminoso?



69

Como vê o David a trajetória do sinal luminoso?

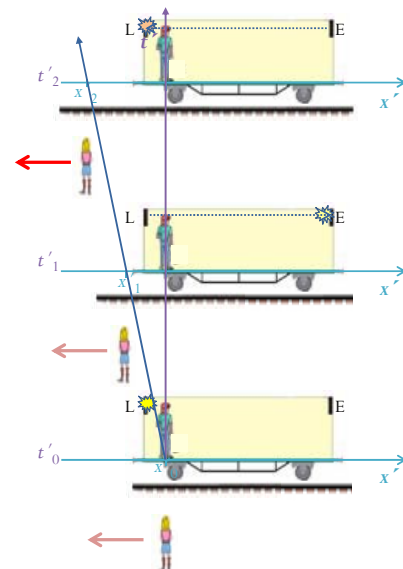
Qual é a trajetória do sinal luminoso?



70

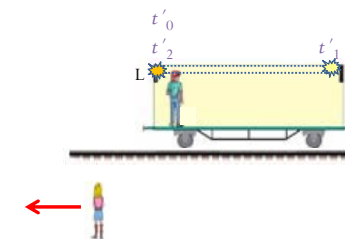
Como vê o David a trajetória do sinal luminoso?

Podemos colocar a sequência de imagens partindo de baixo para cima.



71

Como vê o David a trajetória do sinal luminoso?



O David vê o sinal luminoso descrever a trajetória representada no esquema acima.

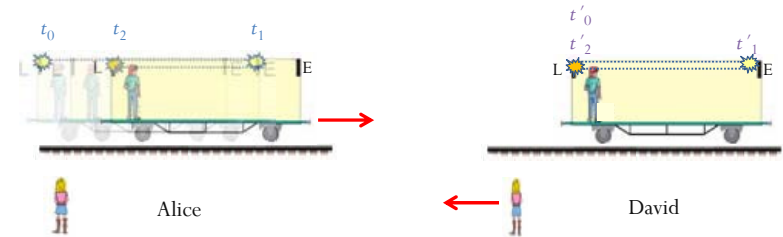
72

Como veem a Alice e o David a trajetória do sinal luminoso?



73

Como veem a Alice e o David a trajetória do sinal luminoso?



A Alice e o David vêem o sinal luminoso descrever trajetórias diferentes.

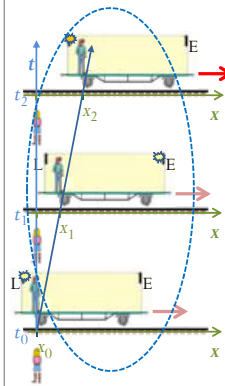
74

Mas a velocidade da luz é igual nos dois referenciais.

Quais são as implicações?

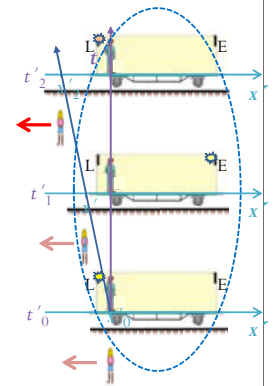
75

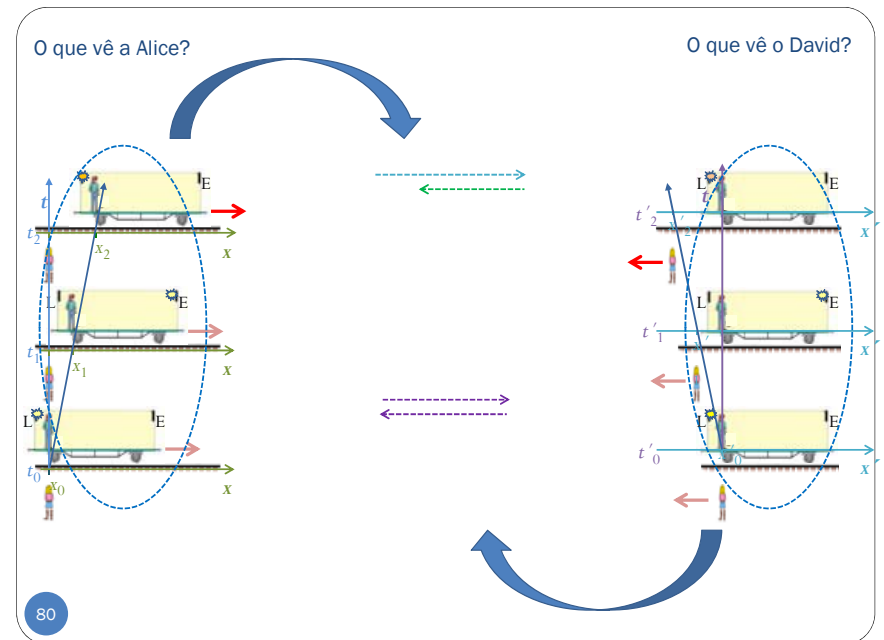
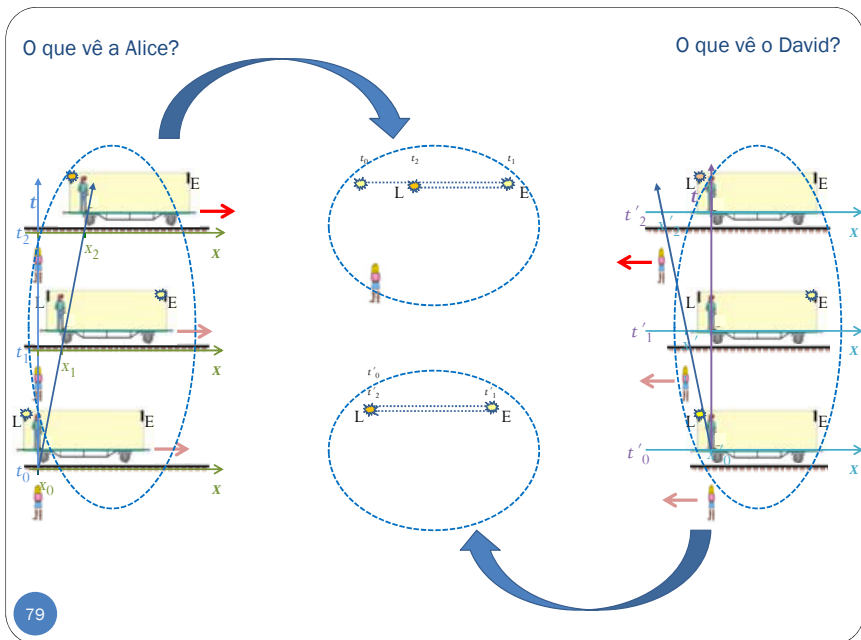
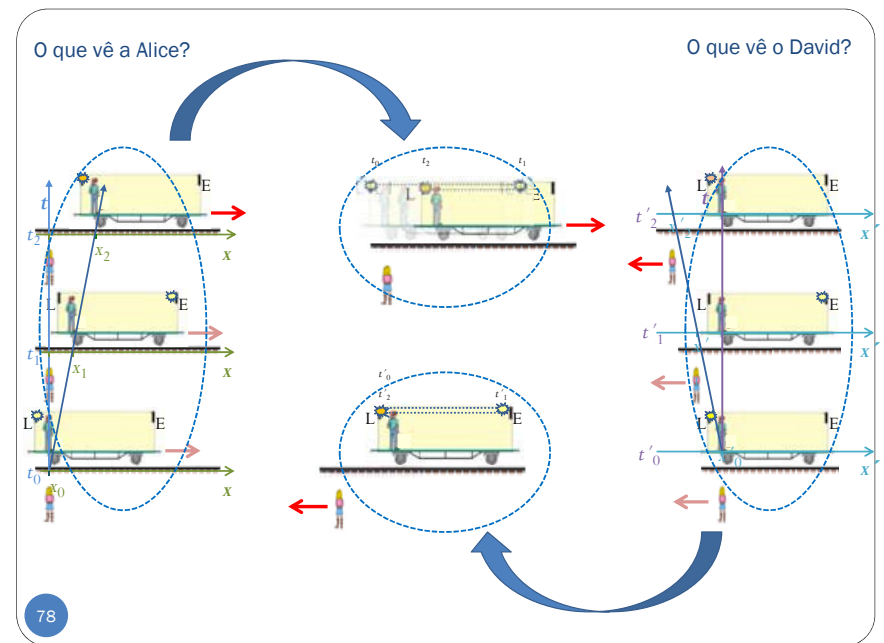
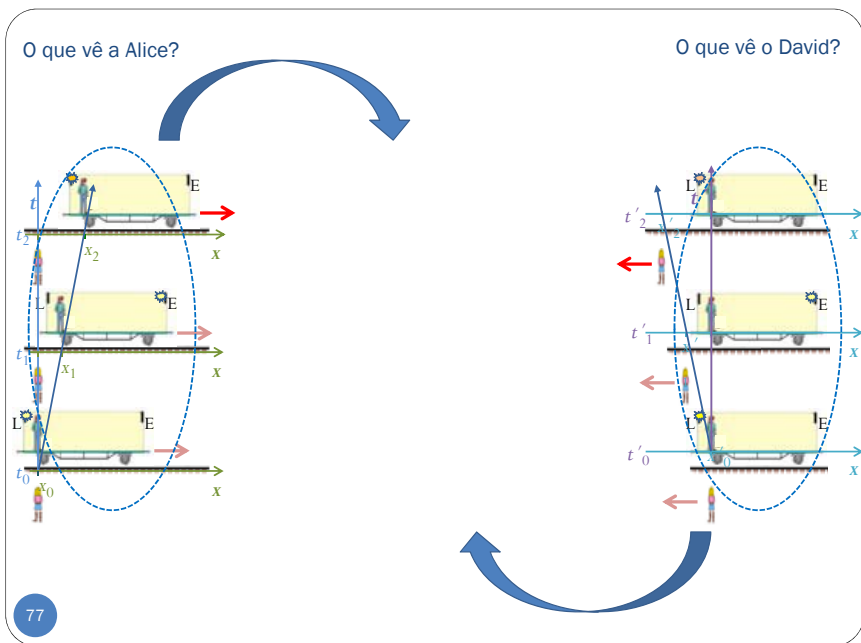
O que vê a Alice?



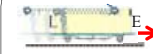
76

O que vê o David?





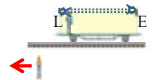
81



t_a é o tempo que o sinal luminoso demora a ir de L até E, medido no referencial da Alice.

t_b é o tempo que o sinal luminoso demora a ir de L até E, medido no referencial da Alice.

t' é o tempo que o sinal luminoso demora a ir de L até E e regressar a L, medido no referencial do David.



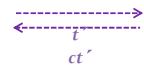
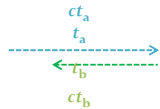
82



t_a é o tempo que o sinal luminoso demora a ir de L até E, medido no referencial da Alice.

t_b é o tempo que o sinal luminoso demora a ir de L até E, medido no referencial da Alice.

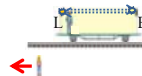
t' é o tempo que o sinal luminoso demora a ir de L até E e regressar a L, medido no referencial do David.



ct_a é a distância que o sinal luminoso percorre de L até E, medido no referencial da Alice.

ct_b é a distância que o sinal luminoso percorre de L até E, medido no referencial da Alice.

ct' é a distância que o sinal luminoso percorre de L até E, ou de E até L, no referencial do David.



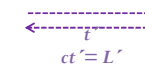
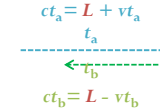
t_a é o tempo que o sinal luminoso demora a ir de L até E, medido no referencial da Alice.

t_b é o tempo que o sinal luminoso demora a ir de L até E, medido no referencial da Alice.

t' é o tempo que o sinal luminoso demora a ir de L até E e regressar a L, medido no referencial do David.

vt_a é a distância que a carruagem percorreu no tempo t_a , no referencial da Alice.

vt_b é a distância que a carruagem percorreu no tempo t_b , no referencial da Alice.



ct_a é a distância que o sinal luminoso percorre de L até E, medido no referencial da Alice.

ct_b é a distância que o sinal luminoso percorre de L até E, medido no referencial da Alice.

L é o comprimento da carruagem medido no referencial da Alice.

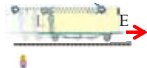
ct' é a distância que o sinal luminoso percorre de L até E, ou de E até L, no referencial do David.

L' é o comprimento da carruagem medido no referencial do David



84

83



t_a é o tempo que o sinal luminoso demora a ir de L até E, medido no referencial da Alice.

t_b é o tempo que o sinal luminoso demora a ir de L até E, medido no referencial da Alice.

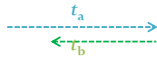
t' é o tempo que o sinal luminoso demora a ir de L até E e regressar a L, medido no referencial do David.

vt_a é a distância que a carruagem percorreu no tempo t_a , no referencial da Alice.

vt_b é a distância que a carruagem percorreu no tempo t_b , no referencial da Alice.

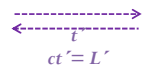
$$t_a = ?$$

$$ct_a = L + vt_a$$



$$ct_b = L - vt_b$$

$$t_b = ?$$



$$t' = ?$$

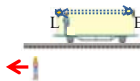
ct_a é a distância que o sinal luminoso percorre de L até E, medido no referencial da Alice.

ct_b é a distância que o sinal luminoso percorre de L até E, medido no referencial da Alice.

L é o comprimento da carruagem medido no referencial da Alice.

ct' é a distância que o sinal luminoso percorre de L até E, ou de E até à L, no referencial do David.

L' é o comprimento da carruagem medido no referencial do David



85



t_a é o tempo que o sinal luminoso demora a ir de L até E, medido no referencial da Alice.

t_b é o tempo que o sinal luminoso demora a ir de L até E, medido no referencial da Alice.

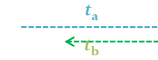
t' é o tempo que o sinal luminoso demora a ir de L até E e regressar a L, medido no referencial do David.

vt_a é a distância que a carruagem percorreu no tempo t_a , no referencial da Alice.

vt_b é a distância que a carruagem percorreu no tempo t_b , no referencial da Alice.

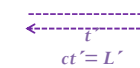
$$t_a = \frac{L}{c-v}$$

$$ct_a = L + vt_a$$



$$ct_b = L - vt_b$$

$$t_b = \frac{L}{c+v}$$



$$t' = \frac{2L'}{c}$$

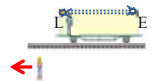
ct_a é a distância que o sinal luminoso percorre de L até E, medido no referencial da Alice.

ct_b é a distância que o sinal luminoso percorre de L até E, medido no referencial da Alice.

L é o comprimento da carruagem medido no referencial da Alice.

ct' é a distância que o sinal luminoso percorre de L até E, ou de E até à L, no referencial do David.

L' é o comprimento da carruagem medido no referencial do David



86



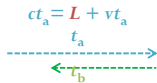
O intervalo de tempo de ida e de volta do sinal luminoso medido pela Alice é:

$$t = t_a + t_b$$

$$t = \frac{L}{c-v} + \frac{L}{c+v}$$

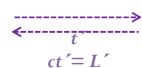
$$t = \frac{2L}{c \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)} \quad (1)$$

$$t_a = \frac{L}{c-v}$$



$$ct_b = L - vt_b$$

$$t_b = \frac{L}{c+v}$$



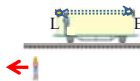
$$t' = \frac{2L'}{c}$$

Utilizando a equação da dilatação dos tempos

$$t = \frac{t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Substituindo em (1) e simplificando chegamos à equação que relaciona os dois comprimentos

$$L = L' \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$



87

Simplificando ...

88

Substituindo a equação da *dilatação do tempo* na equação (1)

$$t = \frac{t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad t = \frac{2L}{c \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} \quad (1)$$

Substituindo

$$t' = \frac{2L'}{c} \Leftrightarrow ct' = 2L'$$

$$\frac{t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{2L}{c \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}$$

$$ct' = \frac{2L \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$2L' = \frac{2L}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$L' = \frac{L}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

E chegamos à equação que relaciona os dois comprimentos, chamada *contração do espaço*

$$L = L' \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

89

Qual o significado da equação da contração do espaço?

$$L = L' \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

90

Qual é o significado da equação da contração do espaço?

L' é o **comprimento próprio** medido no referencial em repouso (próprio) em relação ao acontecimento.

$$L = L' \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

L é o comprimento medido noutro referencial.

v é a velocidade de um referencial em relação ao outro.

c é a velocidade da luz.

Para uma velocidade v igual a $c/2$

$$L = L' \sqrt{1 - \frac{c^2}{2^2 c^2}} \Leftrightarrow L = L' \sqrt{1 - \frac{1}{2^2}} \Leftrightarrow L = 0,866 \times L'$$

91

Qual é o significado da equação da contração do espaço?

L' é o **comprimento próprio** medido no referencial em repouso (próprio) em relação ao acontecimento.

$$L = L' \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

L é o comprimento medido noutro referencial.

v é a velocidade de um referencial em relação ao outro.

c é a velocidade da luz.

Para uma velocidade v igual a $c/2$

$$L = L' \sqrt{1 - \frac{c^2}{2^2 c^2}} \Leftrightarrow L = L' \sqrt{1 - \frac{1}{2^2}} \Leftrightarrow L = 0,866 \times L'$$

A equação permite concluir que o comprimento próprio é sempre maior que o comprimento medido noutro referencial que não o referencial em repouso em relação ao acontecimento.

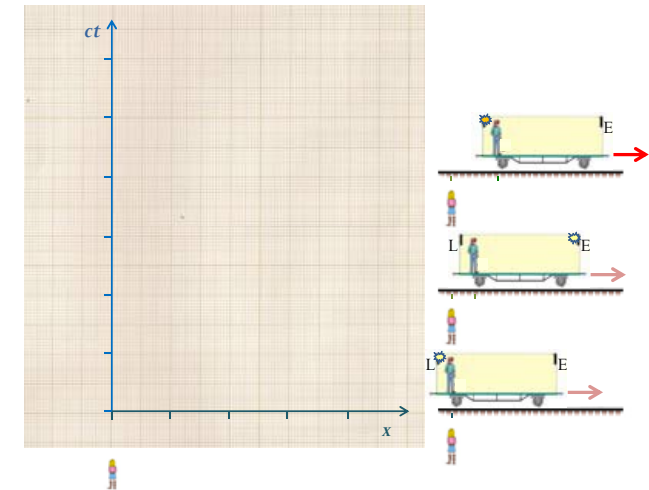
92

Podemos também recorrer à
representação deste acontecimento
utilizando diagramas de espaço-tempo

93

Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

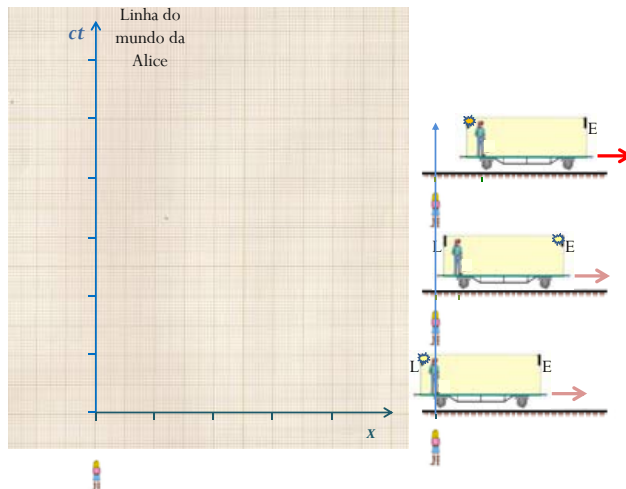
Alice em repouso em
relação à Terra.



94

Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

Alice em repouso em
relação à Terra.

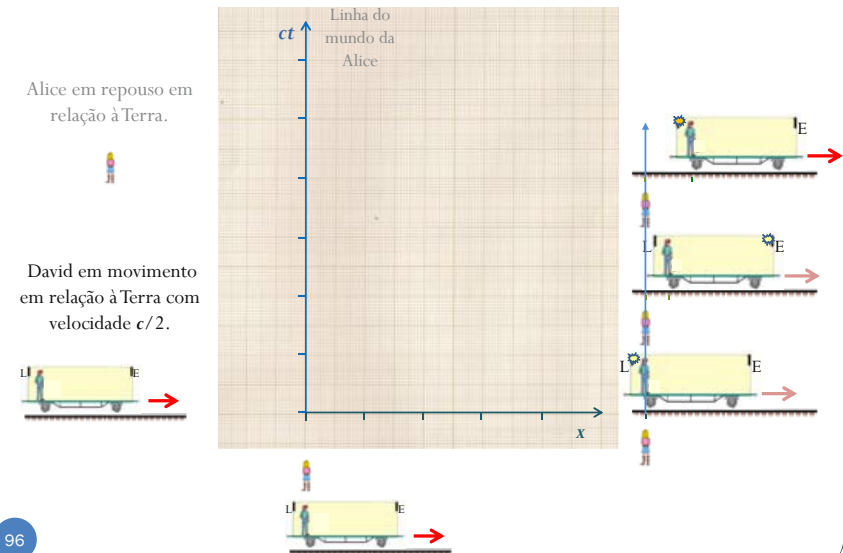


95

Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

Alice em repouso em
relação à Terra.

David em movimento
em relação à Terra com
velocidade $c/2$.



96

Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

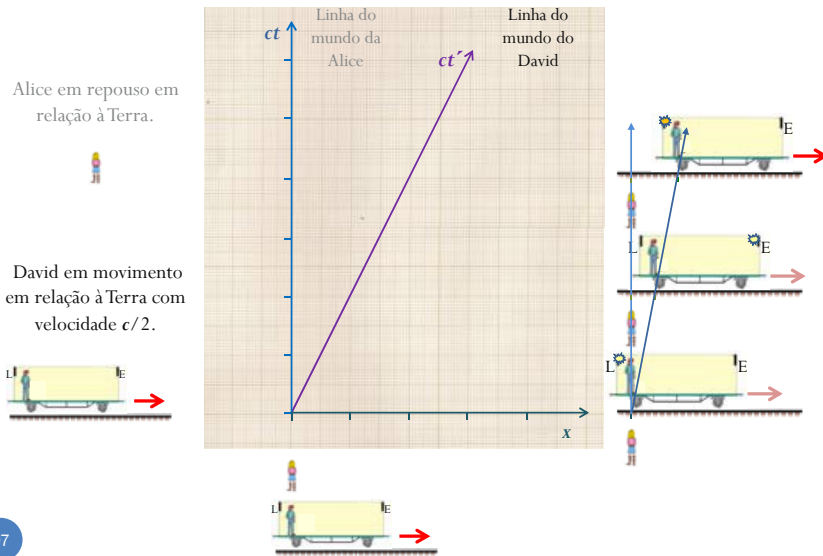


Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

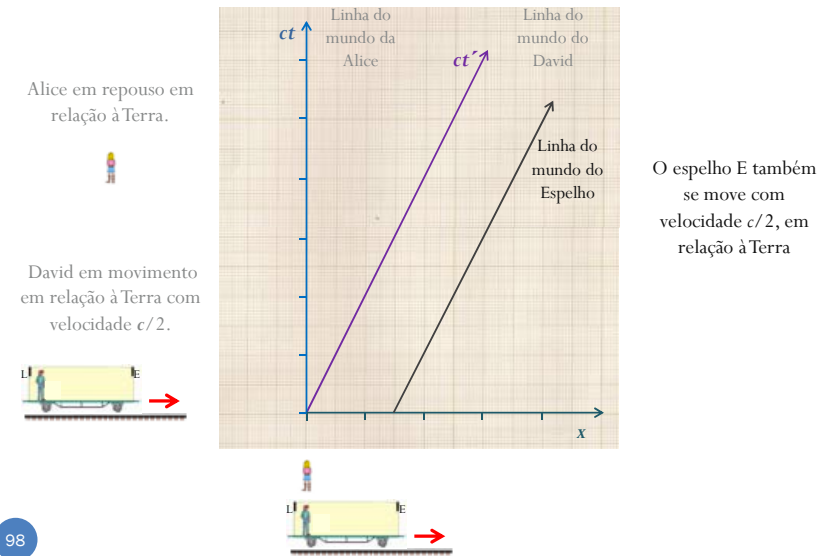


Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

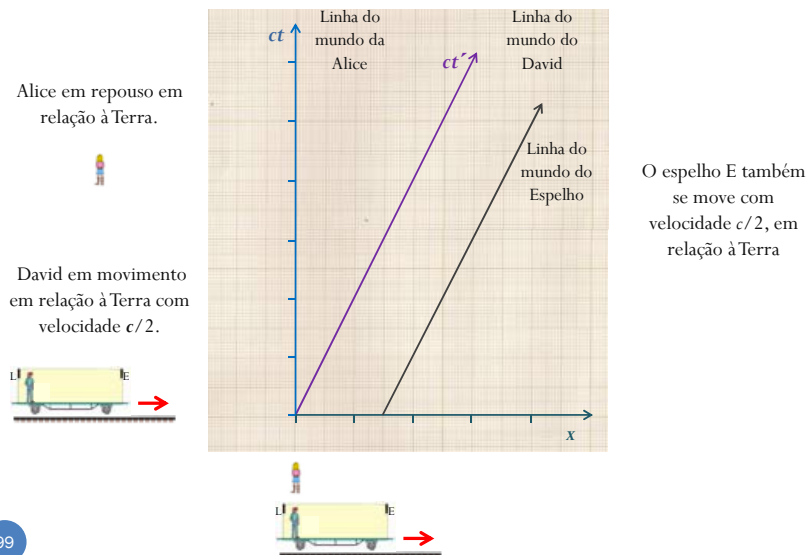


Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

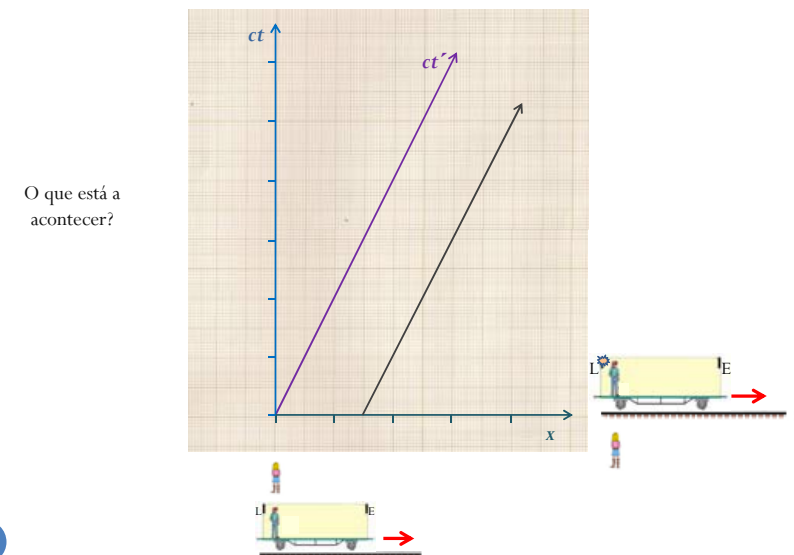
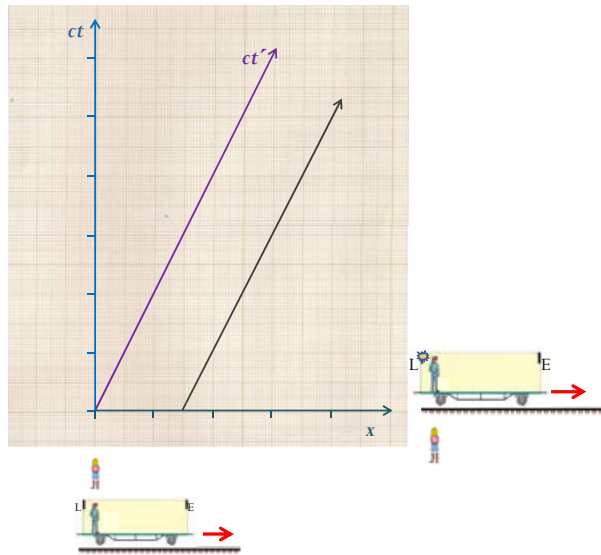


Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

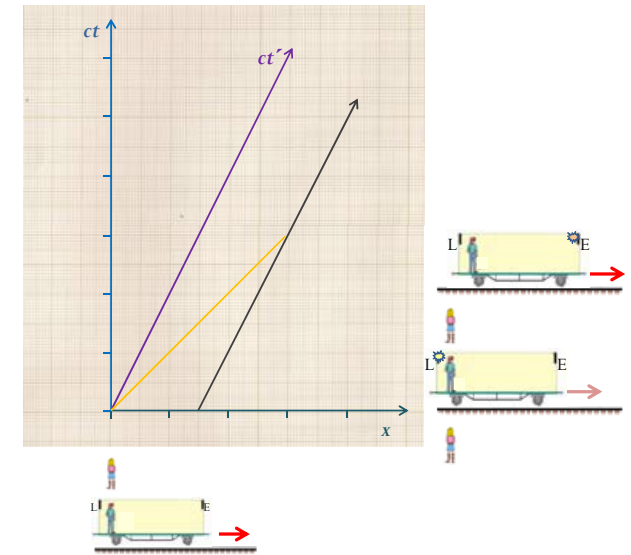
O que está a acontecer?
A lâmpada L emite um sinal luminoso.



101

Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

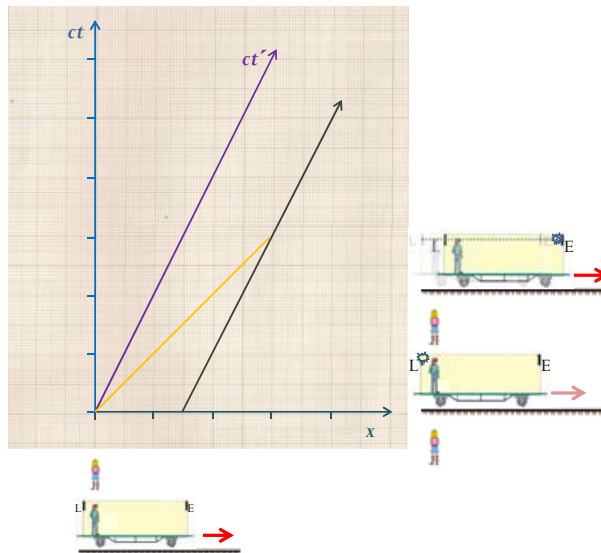
O que está a acontecer?



102

Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

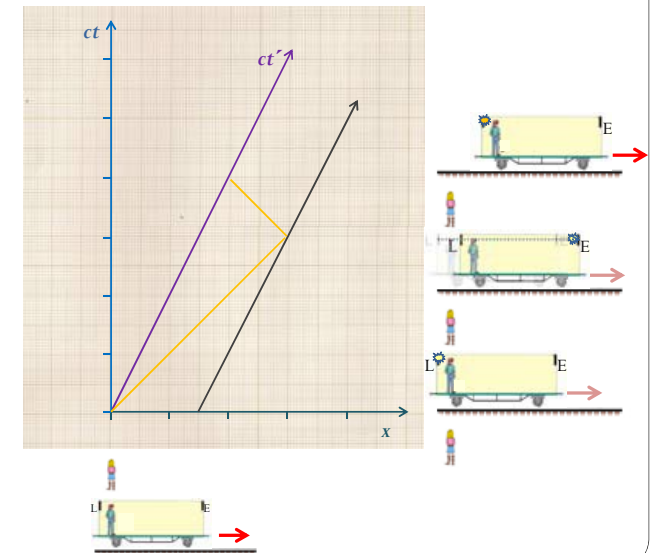
O que está a acontecer?
O sinal luminoso atinge o espelho E.



103

Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

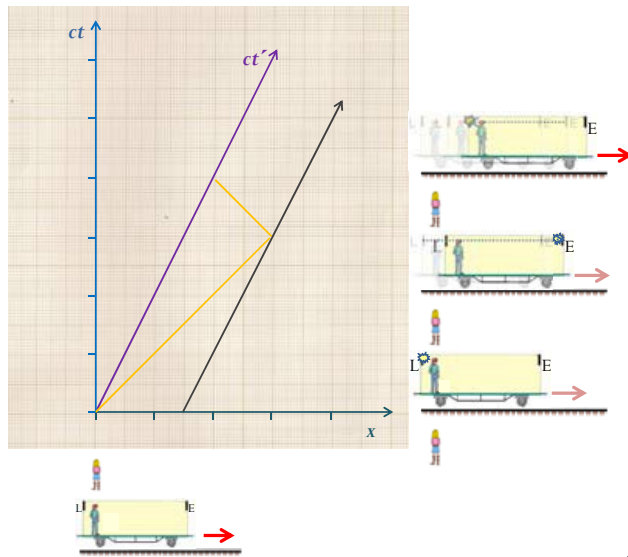
O que está a acontecer?



104

Diagrama de espaço-tempo no referencial da Alice

O que está a acontecer?
O sinal luminoso regressa à lâmpada L.

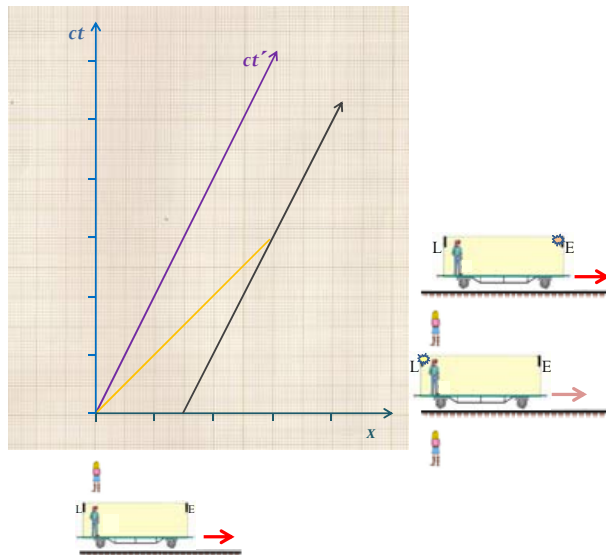


105

Quais são os comprimentos da carruagem medidos pela Alice e David?

106

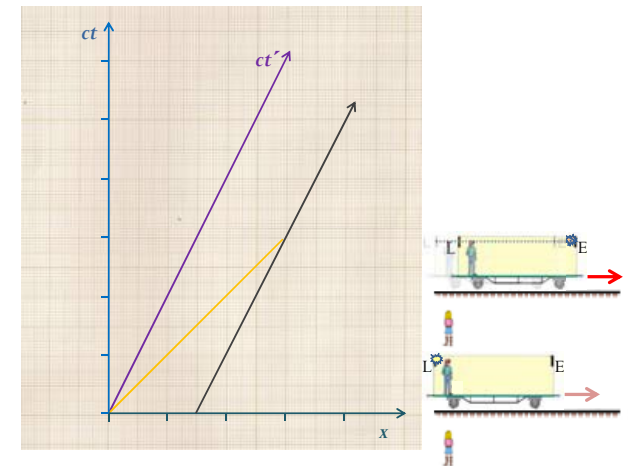
Qual é o comprimento da carruagem medido pela Alice?



107

Qual é o comprimento da carruagem medido pela Alice?

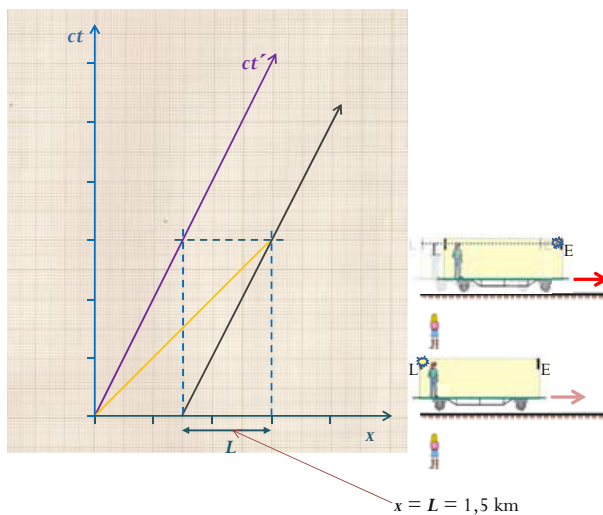
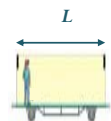
O sinal luminoso atinge o espelho E



108

Qual é o comprimento da carruagem medido pela Alice?

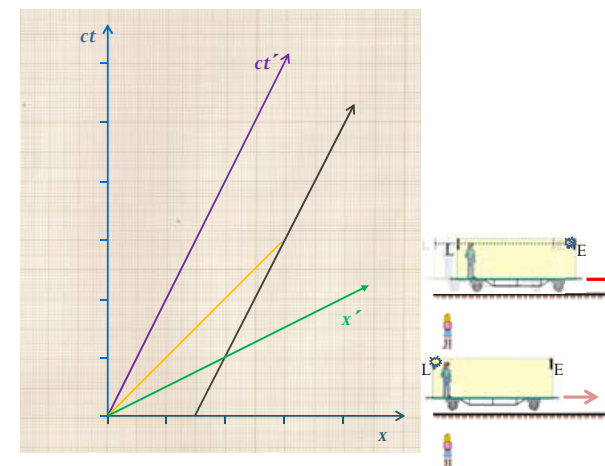
O sinal luminoso atinge o espelho E



109

Qual é o comprimento da carruagem medido pelo David?

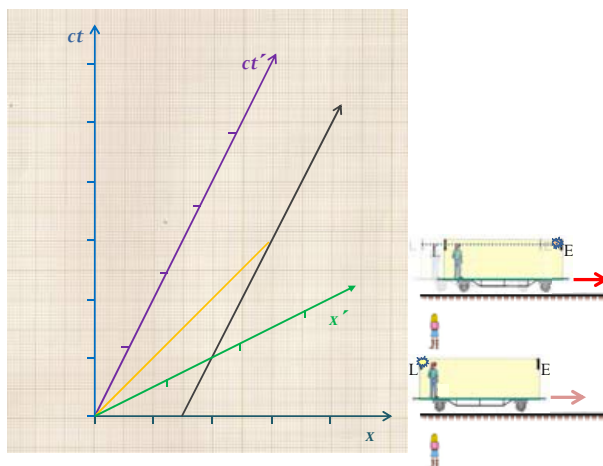
Traçar os eixos das posições para o referencial da carruagem.



110

Qual é o comprimento da carruagem medido pelo David?

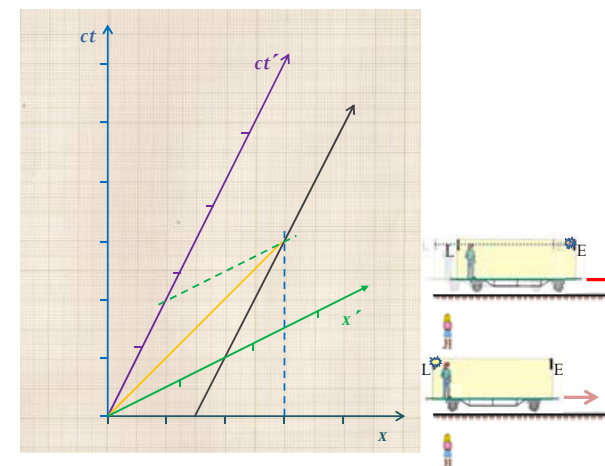
Calibrar os eixos ct' e x' , atendendo que o intervalo espaço-tempo é invariante



111

Qual é o comprimento da carruagem medido pelo David?

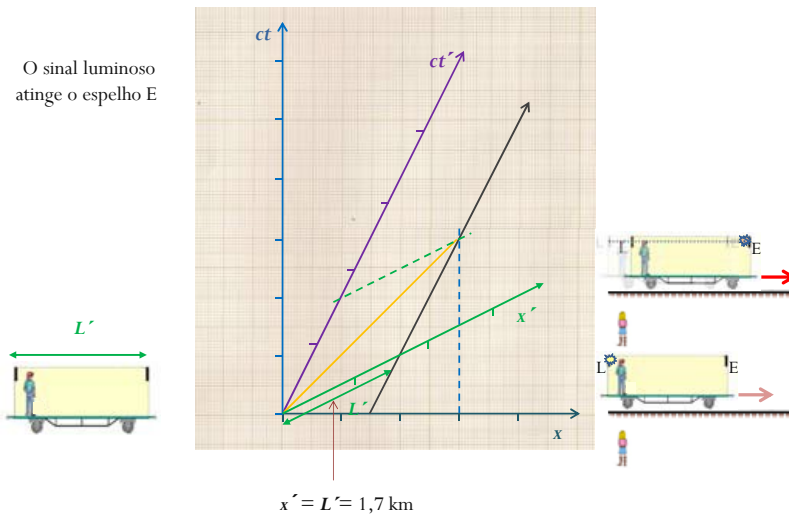
O sinal luminoso atinge o espelho E



112

Qual é o comprimento da carruagem medido pelo David?

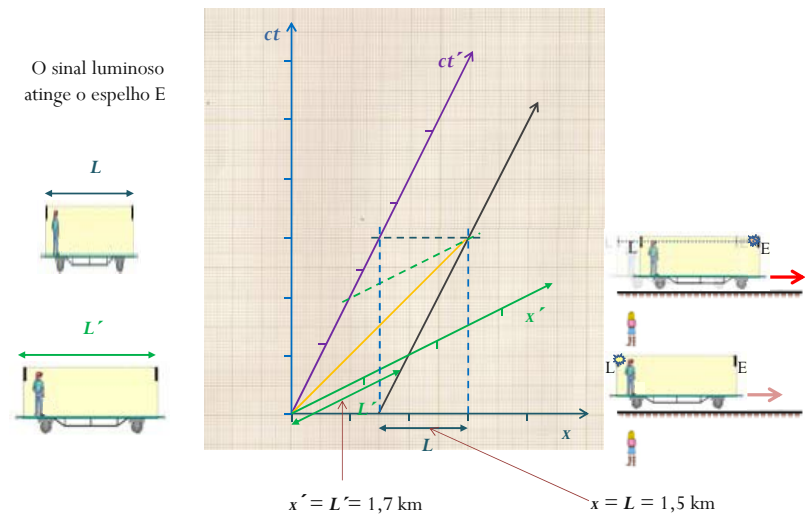
O sinal luminoso atinge o espelho E



113

Quais são os comprimentos da carruagem medidos pela Alice e pelo David?

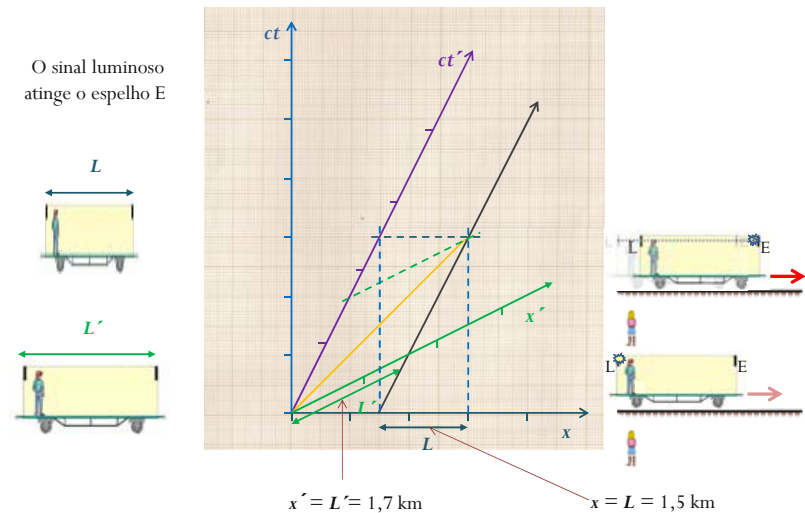
O sinal luminoso atinge o espelho E



114

Qual a relação entre os comprimentos da carruagem medidos pela Alice e pelo David?

Qual é a relação entre os comprimentos da carruagem medidos pela Alice e pelo David?

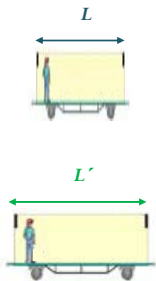


116

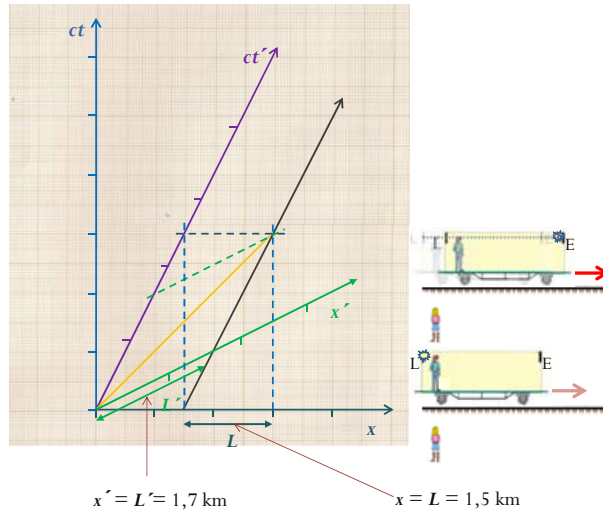
115

Qual é a relação entre os comprimentos da carruagem medidos pela Alice e pelo David?

O sinal luminoso atinge o espelho E



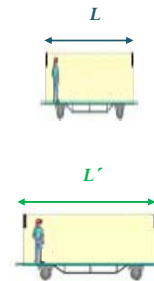
$$\frac{L}{L'} \approx 0,9$$



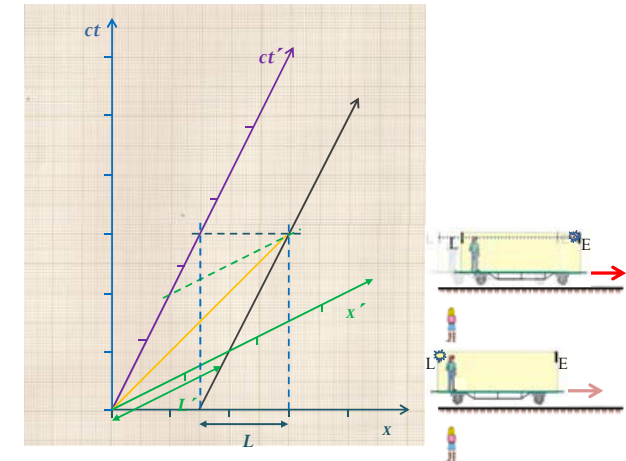
117

Qual é a relação entre os comprimentos da carruagem medidos pela Alice e pelo David?

O sinal luminoso atinge o espelho E



$$\frac{L}{L'} \approx 0,9$$



de acordo com o valor encontrado pela equação da contração do espaço.

118

Podemos concluir que:

- O comprimento da carruagem medido pela Alice é diferente do comprimento da carruagem medido pelo David.
- O comprimento de um objeto (ou a distância medida) não é absoluto, é um conceito relativo.
- O David mede o comprimento próprio da carruagem, pois ele encontra-se em repouso em relação à carruagem.
- A Alice mede um comprimento menor porque encontra-se em movimento em relação ao referencial carruagem.
- Este fenómeno é conhecido por **contração do espaço**.
- A equação que relaciona os comprimentos L e L' é a **equação da contração do espaço**.

$$L = L' \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

- O comprimentos L é sempre menor que o comprimento L' porque v é sempre menor que a velocidade da luz c .

119

Podemos concluir que:

- No referencial Terra, a Alice tem dificuldade em medir as extremidades da carruagem em movimento, primeiro observa a extremidade dianteira e depois a extremidade traseira, causando uma contração do comprimento da carruagem.
- No referencial da carruagem o David (em repouso em relação à carruagem), não tem dificuldade em medir os extremos da carruagem.

120

Anexo III — Inquérito por questionário aplicado a alunos

Questionário sobre a TRR

Este questionário é anónimo e demorará cerca de 5 minutos a responder.
Peço a tua colaboração para responder com honestidade às perguntas seguintes.

Obrigado pela tua colaboração.

* Required

1. **1. Género ***

Mark only one oval.

- ☐ Feminino
☐ Masculino

2. **2. Idade ***

Mark only one oval.

- ☐ 17 anos
☐ 18 anos
☐ 19 anos

3. **3. Evolução histórica do tema é interessante ***

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Discordas totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordas totalmente

4. **4. O tema proporciona uma visão do papel da comunidade científica na construção do conhecimento científico ***

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Discordas totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordas totalmente

5. **5. A sequência de atividades permitiu compreender a experiência de Michelson- Morley ****Mark only one oval.*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Discordas totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordas totalmente

6. **6. A sequência de atividades permitiu compreender a dilatação do tempo ****Mark only one oval.*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Discordas totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordas totalmente

7. **7. A sequência de atividades permitiu compreender os diagramas de espaço-tempo ****Mark only one oval.*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Discordas totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordas totalmente

8. **8. A sequência de atividades permitiu compreender a contração do espaço ****Mark only one oval.*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Discordas totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordas totalmente

9. **9. A sequência de atividades permitiu compreender as expressões matemáticas da dilatação do tempo e da contração do espaço ****Mark only one oval.*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Discordas totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordas totalmente

10. **10. A matemática envolvida é de fácil aplicação ****Mark only one oval.*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Discordas totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordas totalmente

11. **11. Os conceitos relativistas são conceptualmente difíceis ****Mark only one oval.*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Discordas totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordas totalmente

12. **12. A Teoria da Relatividade Restrita é um tema interessante ****Mark only one oval.*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Discordas totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordas totalmente

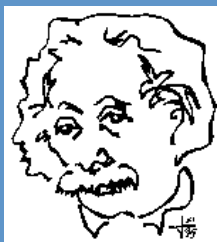
13. **13. A Teoria da Relatividade Restrita é um tema que deveria constar no programa da disciplina opcional de Física do 12.º ano ****Mark only one oval.*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Discordas totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordas totalmente

14. **14. A Teoria da Relatividade Restrita é um tema que motiva os alunos para estudarem Física ****Mark only one oval.*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Discordas totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordas totalmente

Anexo IV — Documento complementar ao teste (utilizado por alunos)



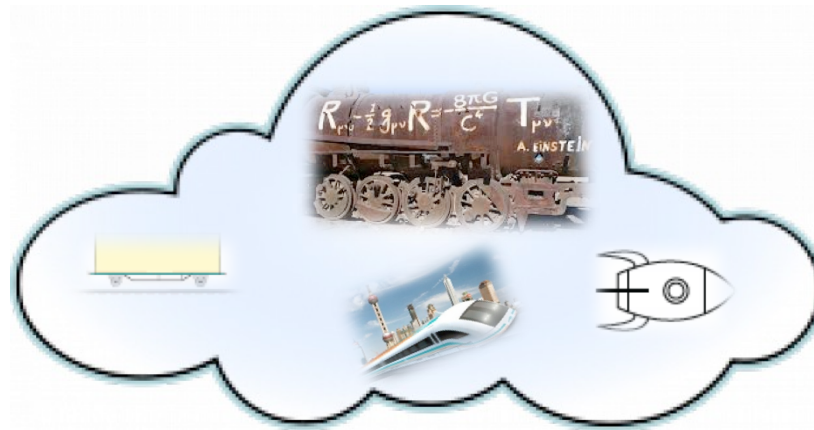
Teoria da Relatividade Restrita

Algumas questões

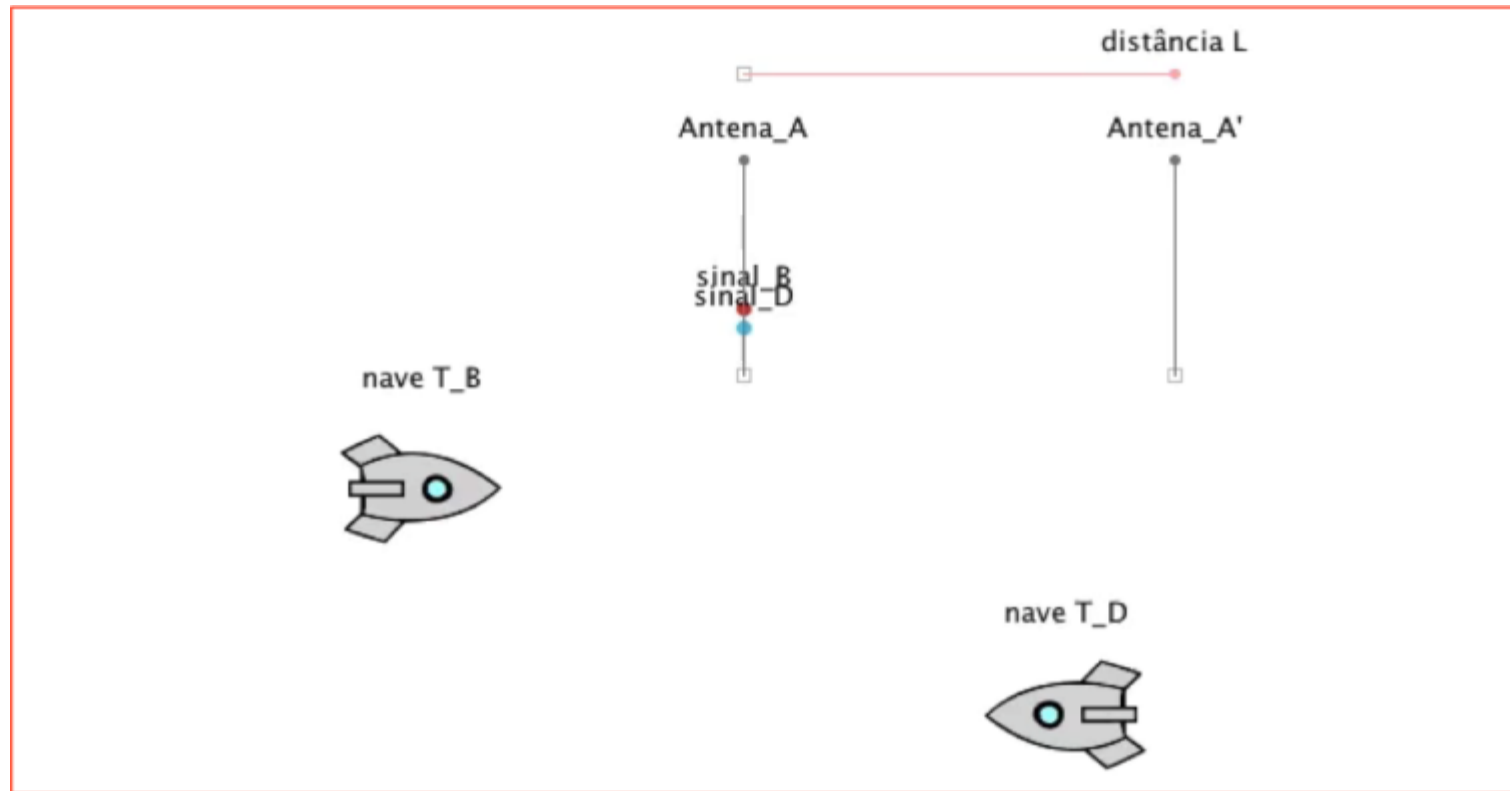


“Gedanken” Experiments.

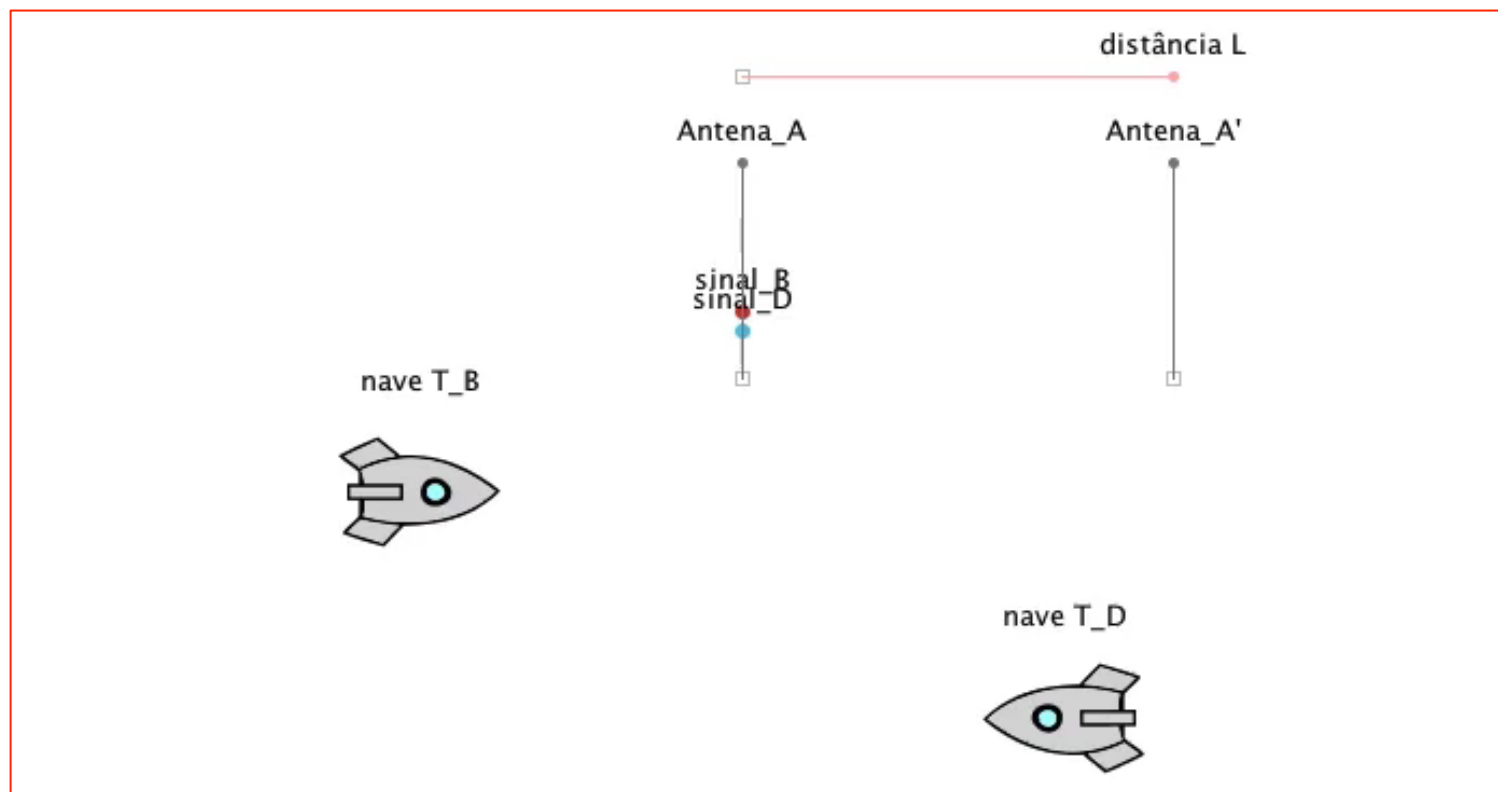
“Experiências Imaginadas”



Observe com a tenção o seguinte filme e responda às questões



Duas naves espaciais, $T_B (N_A)$ e $T_D (N_B)$, viajam com a velocidade $v = c/2$, em sentidos opostos ao longo da mesma linha reta. “ c ” representa a velocidade da luz no vácuo. Quando passam pela antena A (A_1), esta emite um sinal luminoso B (L_A) no sentido em que viaja a nave $T_B (N_A)$ e, simultaneamente, outro sinal luminoso D (L_B) no sentido em que viaja a nave $T_D (N_A)$.

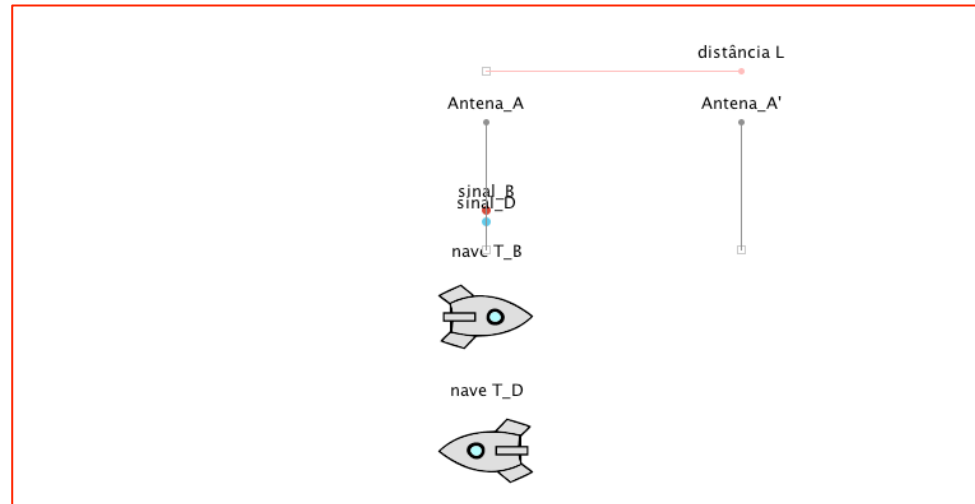


Duas naves espaciais, $T_B (N_A)$ e $T_D (N_B)$, viajam com a velocidade $v = c/2$, em sentidos opostos ao longo da mesma linha reta. “ c ” representa a velocidade da luz no vácuo. Quando passam pela antena A (A_1), esta emite um sinal luminoso B (L_A) no sentido em que viaja a nave $T_B (N_A)$ e, simultaneamente, outro sinal luminoso D (L_B) no sentido em que viaja a nave $T_D (N_A)$.

Legenda:

Nave $T_D =$ nave N_B

Sinal luminoso D = L_B



Legenda:

Nave $T_B =$ nave N_A

Sinal luminoso B = L_A

Q1 - No referencial da Terra, a que distância de antena A_1 se encontrarão cada uma das naves N_A e N_B e o sinal L_A quando L_A atinge a antena A_2 , que está à distância d da antena A_1 ? Porquê?

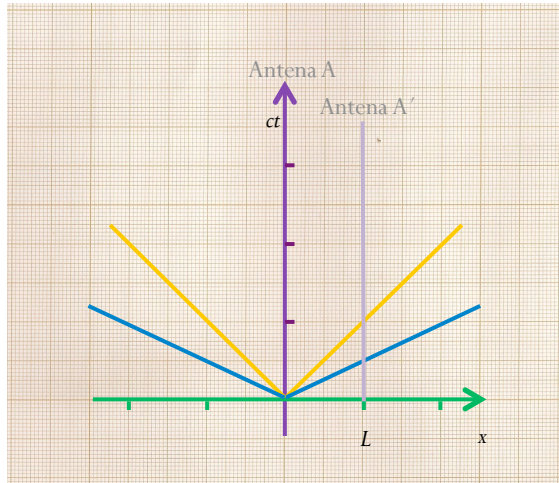
Sinal L_A :

Nave N_A :

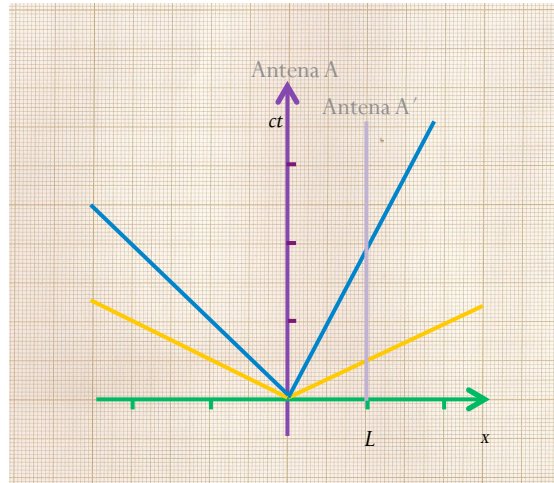
Nave N_B :

Q1' - Qual é o diagrama de espaço-tempo que responde à questão anterior?

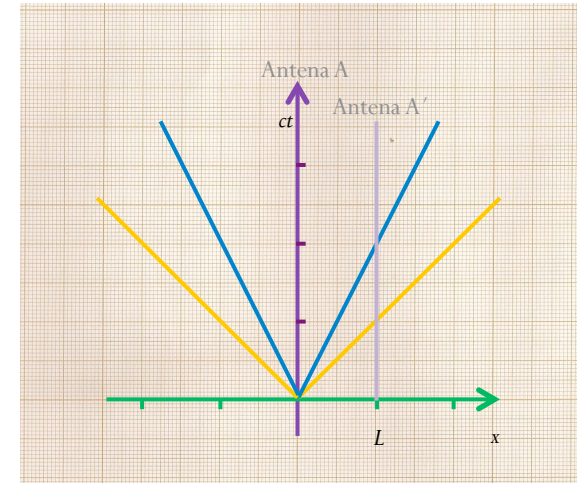
(Q1- No referencial da Terra, a que distância de antena A_1 se encontrarão cada uma das naves N_A e N_B e o sinal L_A quando L_A atinge a antenna A_2 , que está à distância d da antenna A_1 ? Porquê?)



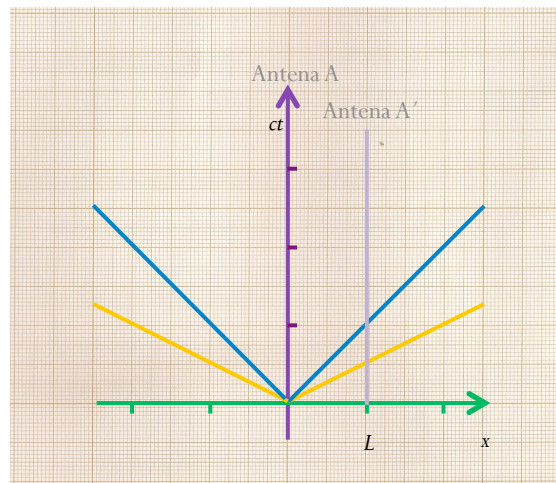
A



B



C



D

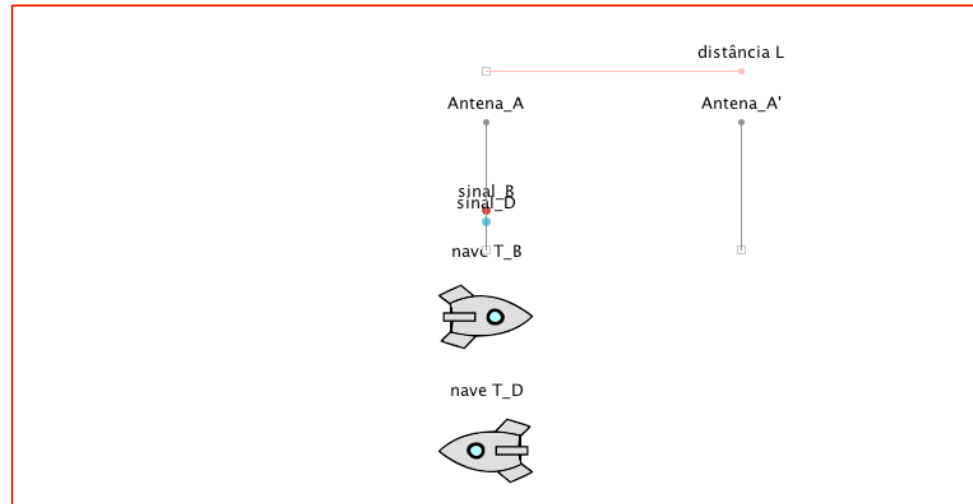
- Linhas do mundo dos sinais luminosos L_A e L_B
- Linhas do mundo das naves espaciais, N_A e N_B

Duas naves espaciais, $T_B (N_A)$ e $T_D (N_B)$, viajam com a velocidade $v = c/2$, em sentidos opostos ao longo da mesma linha reta. “ c ” representa a velocidade da luz no vácuo. Quando passam pela antena A (A_1), esta emite um sinal luminoso B (L_A) no sentido em que viaja a nave $T_B (N_A)$ e, simultaneamente, outro sinal luminoso D (L_B) no sentido em que viaja a nave $T_D (N_A)$.

Legenda:

Nave $T_D =$ nave N_B

Sinal luminoso D = L_B



Legenda:

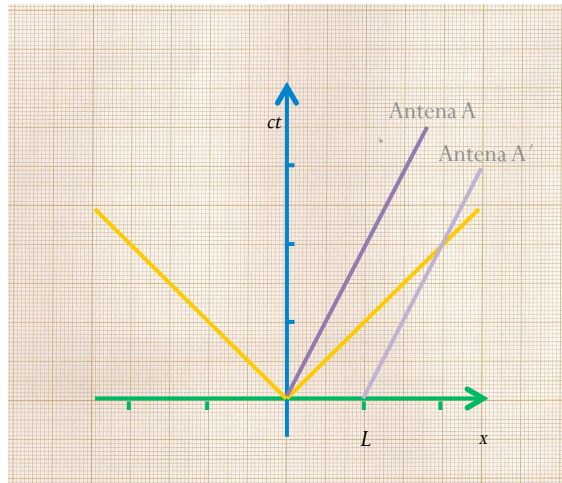
Nave $T_B =$ nave N_A

Sinal luminoso B = L_A

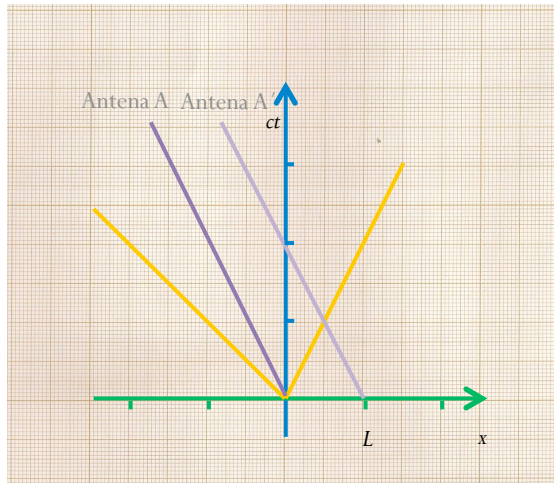
Q2 - Suponha que viajava na nave N_B . Quando o sinal L_A atingisse a antena A_2 , os sinais L_A e L_B estão ambos à mesma distância de si ou a distância de si a L_A é diferente da distância de si a L_B ? Porquê?

Q2' - Qual é o diagrama de espaço-tempo que responde à questão anterior?

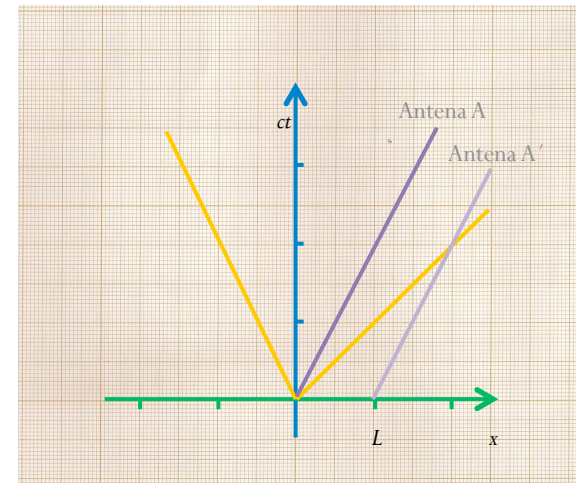
(Q2 - Suponha que viaje na nave N_B . Quando o sinal L_A atingisse a antena A_2 , os sinais L_A e L_B estão ambos à mesma distância de si ou a distância de si a L_A é diferente da distância de si a L_B ? Porquê?)



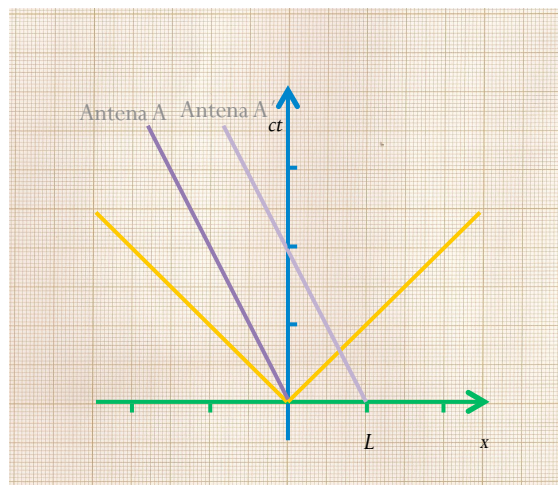
A



B



C



D

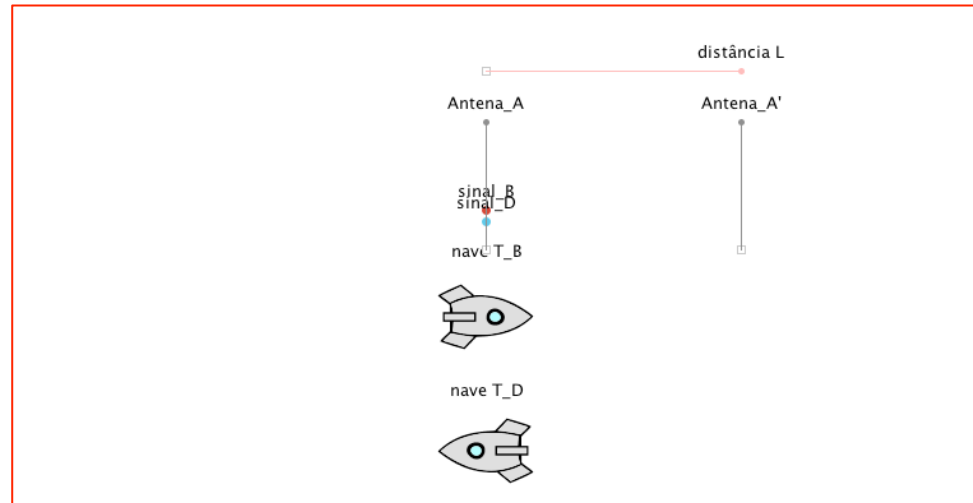
- Linhas do mundo dos sinais luminosos L_A e L_B .
- Linha do mundo da nave espacial N_B .

Duas naves espaciais, $T_B (N_A)$ e $T_D (N_B)$, viajam com a velocidade $v = c/2$, em sentidos opostos ao longo da mesma linha reta. “ c ” representa a velocidade da luz no vácuo. Quando passam pela antena A (A_1), esta emite um sinal luminoso B (L_A) no sentido em que viaja a nave $T_B (N_A)$ e, simultaneamente, outro sinal luminoso D (L_B) no sentido em que viaja a nave $T_D (N_A)$.

Legenda:

Nave T_D = nave N_B

Sinal luminoso D = L_B



Legenda:

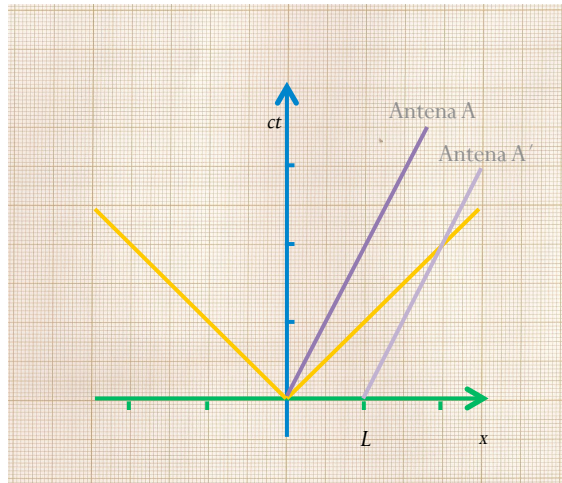
Nave T_B = nave N_A

Sinal luminoso B = L_A

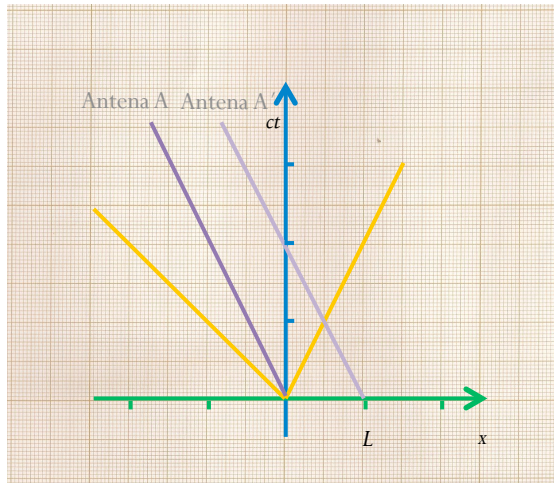
Q3 - Suponha que viajava na nave N_A . Quando o sinal L_A atingisse a antena A_2 , os sinais L_A e L_B estão ambos à mesma distância A de si ou a distância de si a L_A é diferente da distância de si a L_B ? Porquê?

Q3' - Qual é o diagrama de espaço-tempo que responde à questão anterior?

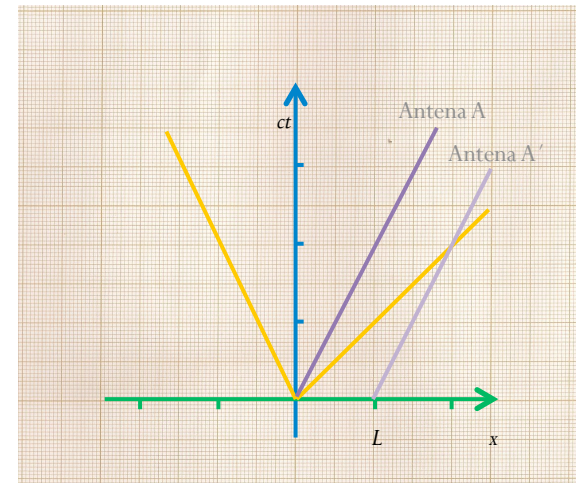
(Q3 - Suponha que viajara na nave N_A . Quando o sinal L_A atingisse a antena A_2 , os sinais L_A e L_B estão ambos à mesma distância A de si ou a distância de si a L_A é diferente da distância de si a L_B ? Porquê?)



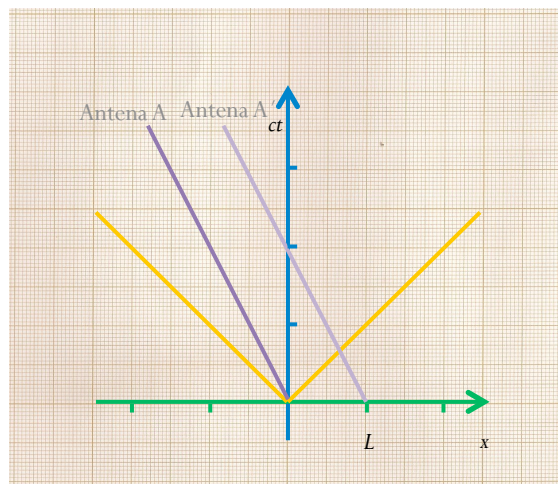
A



B



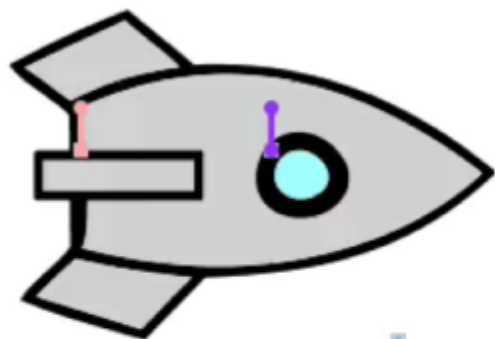
C



D

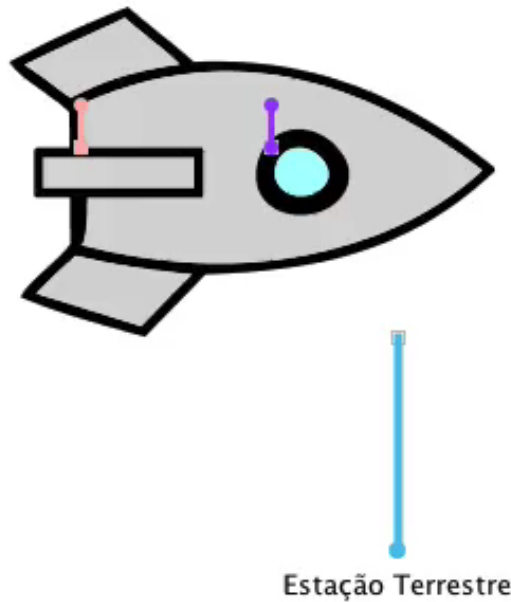
- Linhas do mundo dos sinais luminosos L_A e L_B .
- Linha do mundo do veículo espacial N_A .

Observe com a tenção o seguinte filme e responda às questões

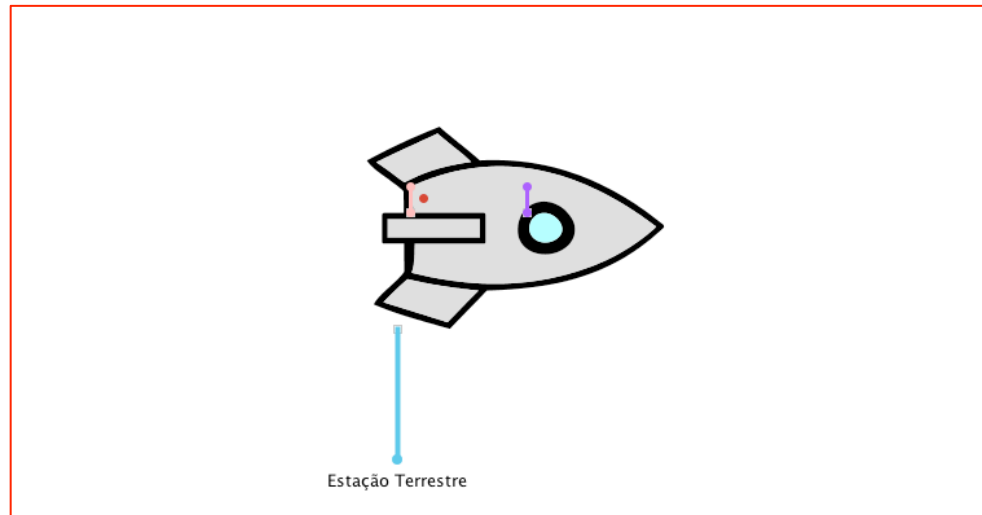


Estação Terrestre

Uma nave possui uma antena A na extremidade traseira e um espelho E na sua extremidade dianteira. A distância entre a antena A e o espelho E é d . A nave viaja a uma velocidade $v = c/2$ e passa por cima de uma estação terrestre, na vertical. Nesse instante, a antena A emite um sinal luminoso. O sinal atinge o espelho E, é refletido e regressa à antena A.



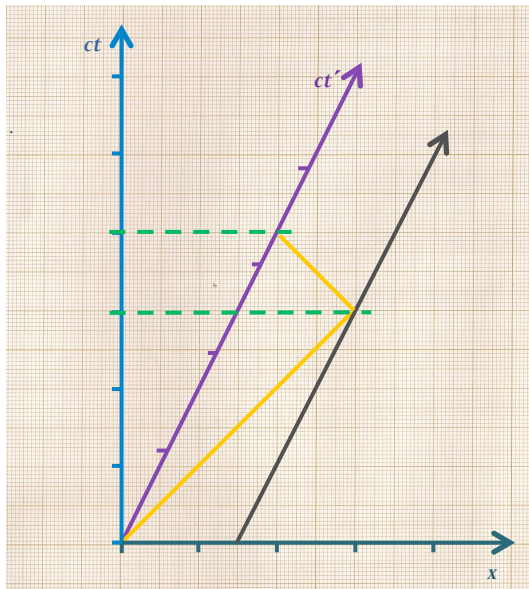
Uma nave possui uma antena A na extremidade traseira e um espelho E na sua extremidade dianteira. A distância entre a antena A e o espelho E é d . A nave viaja a uma velocidade $v = c/2$ e passa por cima de uma estação terrestre, na vertical. Nesse instante, a antena A emite um sinal luminoso. O sinal atinge o espelho E, é refletido e regressa à antena A.



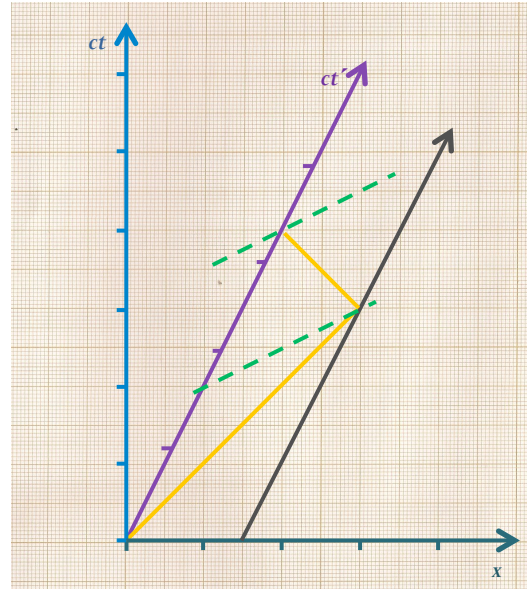
Q4 - Para alguém que viaje na nave, o sinal luminoso demora mais tempo a ir da antena A ao espelho E ou a regressar do espelho E à antena A? Porquê?

Q4' - Qual é o diagrama de espaço-tempo que responde à questão anterior?

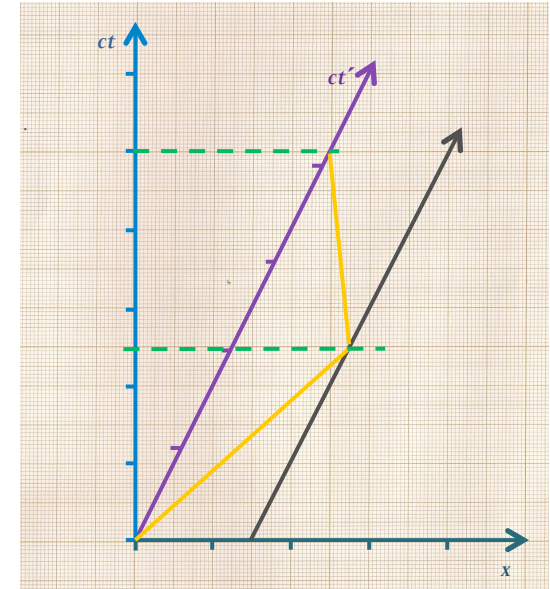
(Q4 - Para alguém que viaje na nave, o sinal luminoso demora mais tempo a ir da antena A ao espelho E ou a regressar do espelho E à antena A? Porquê?)



A



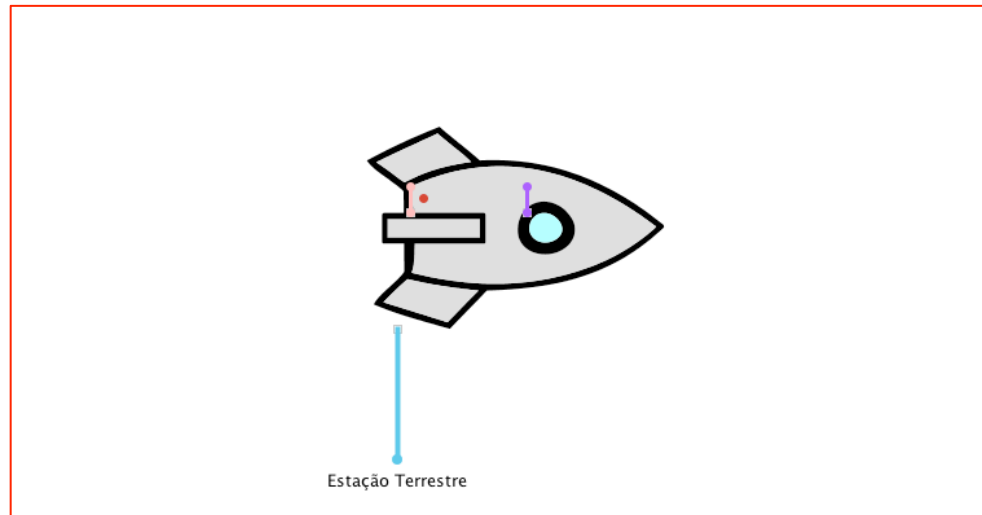
B



C

- Linha do mundo do sinal luminoso.
- Linha do mundo da estação terrestre.
- Linha do mundo da antena A (na nave).
- Linha do mundo do espelho E (na nave).

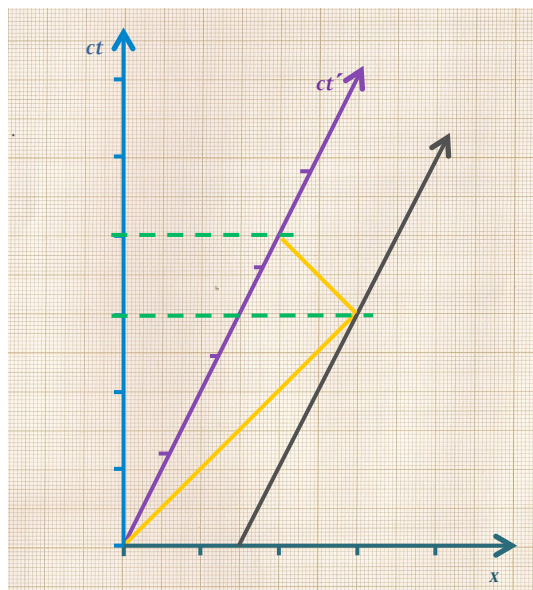
Uma nave possui uma antena A na extremidade traseira e um espelho E na sua extremidade dianteira. A distância entre a antena A e o espelho E é d . A nave viaja a uma velocidade $v = c/2$ e passa por cima de uma estação terrestre, na vertical. Nesse instante, a antena A emite um sinal luminoso. O sinal atinge o espelho E, é refletido e regressa à antena A.



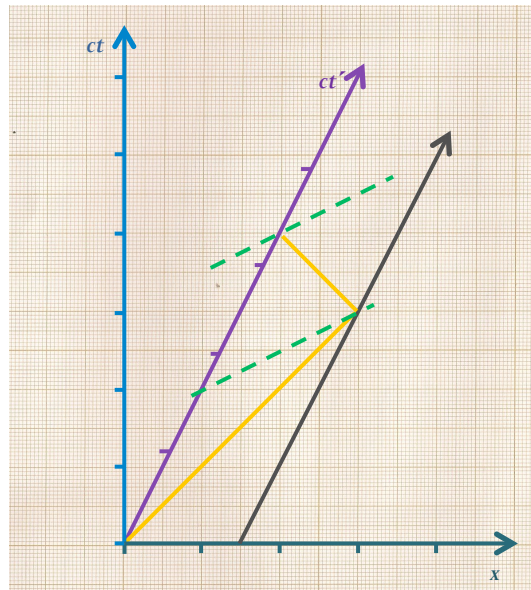
Q5 - Para alguém que esteja na estação terrestre, o sinal luminoso demora mais tempo a ir da antena A ao espelho E ou a regressar do espelho E à antena A? Porquê?

Q5' - Qual é o diagrama de espaço-tempo que responde à questão anterior?

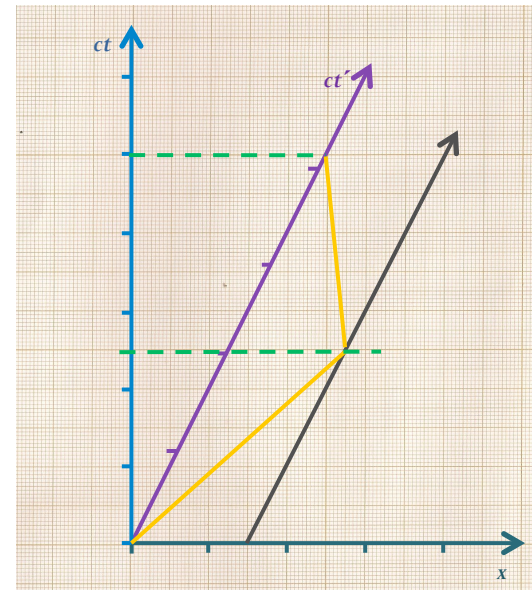
(Q5 - Para alguém que esteja na estação terrestre, o sinal luminoso demora mais tempo a ir da antena A ao espelho E ou a regressar do espelho E à antena A? Porquê?)







A



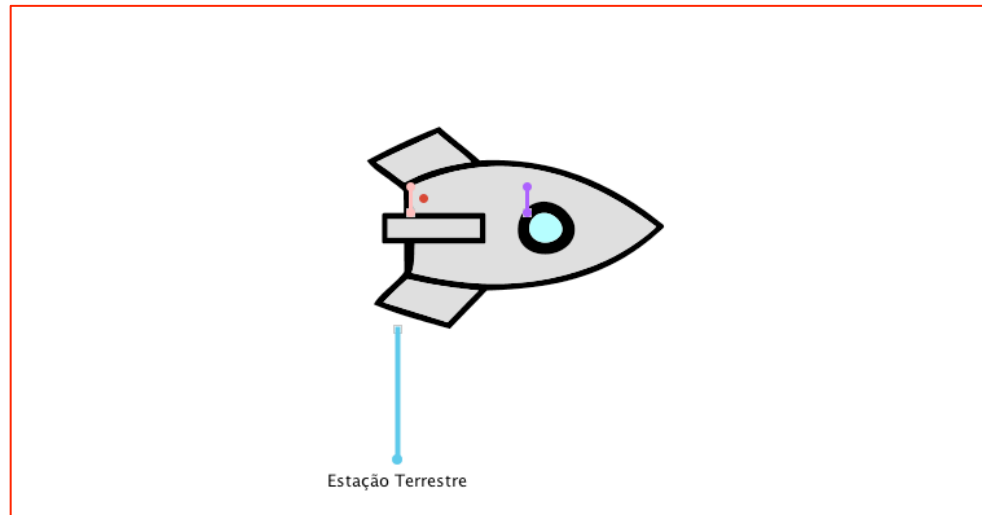
B



C

-  Linha do mundo do sinal luminoso.
-  Linha do mundo da estação terrestre.
-  Linha do mundo da antena A (na nave).
-  Linha do mundo do espelho E (na nave).

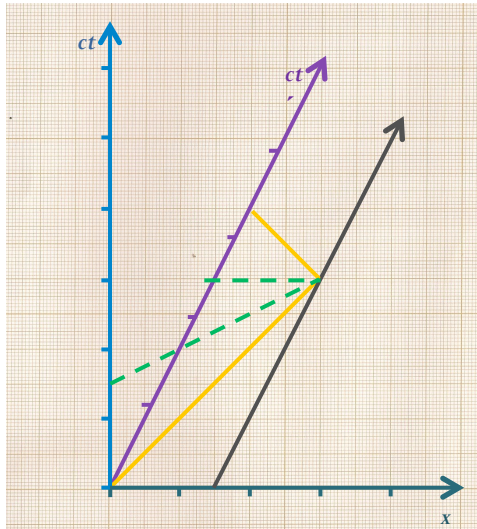
Uma nave possui uma antena A na extremidade traseira e um espelho E na sua extremidade dianteira. A distância entre a antena A e o espelho E é d . A nave viaja a uma velocidade $v = c/2$ e passa por cima de uma estação terrestre, na vertical. Nesse instante, a antena A emite um sinal luminoso. O sinal atinge o espelho E, é refletido e regressa à antena A.



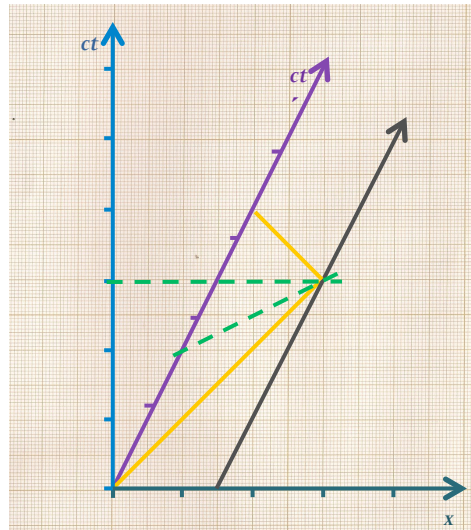
Q6 - O sinal luminoso demora mais tempo a percorrer a distância da antena A ao espelho E para alguém na nave ou para alguém na estação terrestre? Porquê?

Q6' - Qual é o diagrama de espaço-tempo que responde à questão anterior?

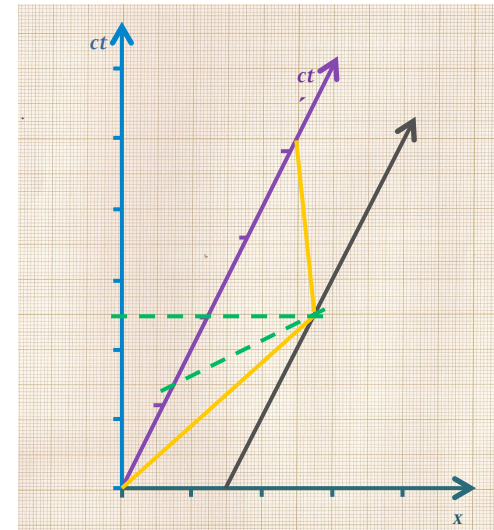
(Q6 - O sinal luminoso demora mais tempo a percorrer a distância da antena A ao espelho E para alguém na nave ou para alguém na estação terrestre? Porquê?)



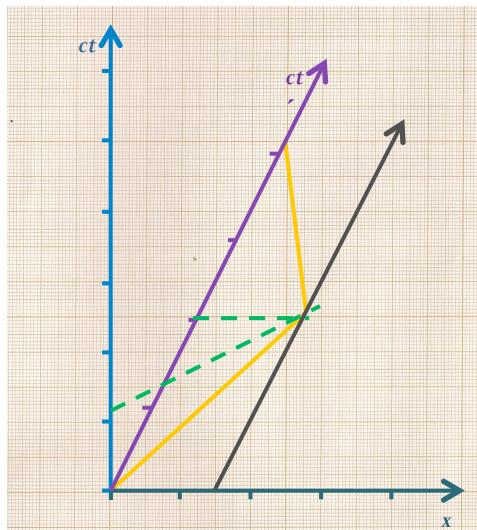
A



B



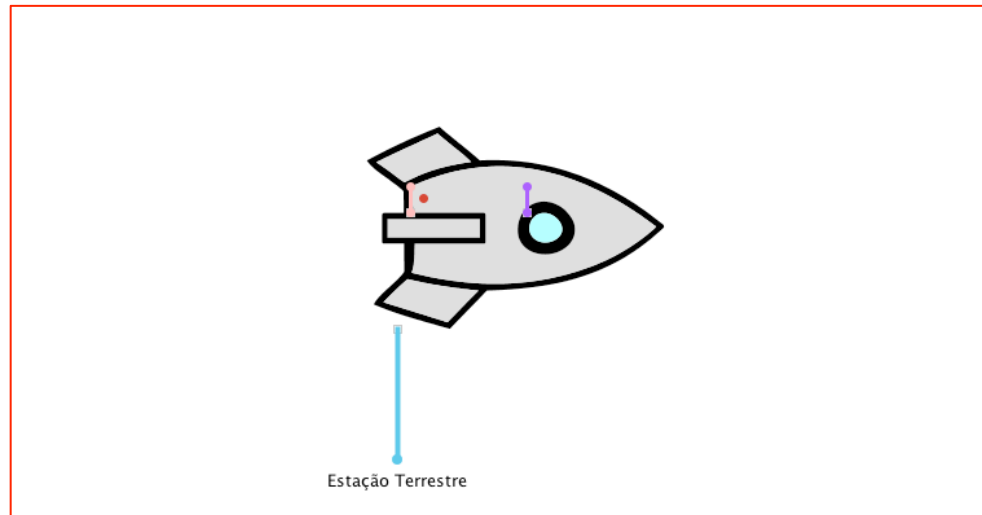
C



D

- Linha do mundo do sinal luminoso.
- Linha do mundo da estação terrestre.
- Linha do mundo da antena A (na nave).
- Linha do mundo do espelho E (na nave).

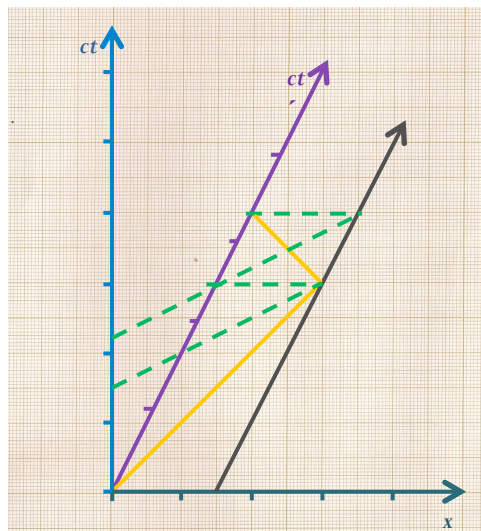
Uma nave possui uma antena A na extremidade traseira e um espelho E na sua extremidade dianteira. A distância entre a antena A e o espelho E é d . A nave viaja a uma velocidade $v = c/2$ e passa por cima de uma estação terrestre, na vertical. Nesse instante, a antena A emite um sinal luminoso. O sinal atinge o espelho E, é refletido e regressa à antena A.



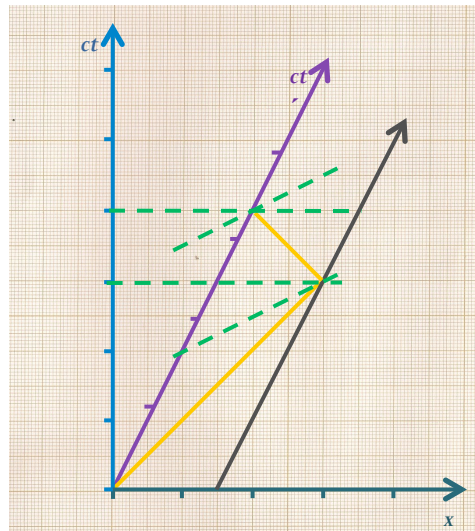
Q7 - O sinal luminoso demora mais tempo a percorrer a distância do espelho E à antena A para alguém na nave ou para alguém na estação terrestre? Porquê?

Q7' - Qual é o diagrama de espaço-tempo que responde à questão anterior?

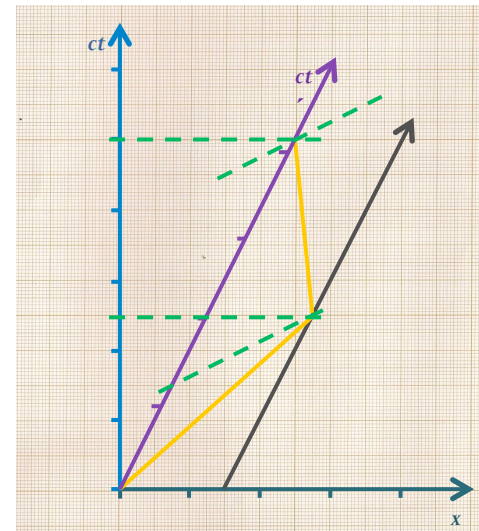
(Q7 - O sinal luminoso demora mais tempo a percorrer a distância do espelho E à antena A para alguém na nave ou para alguém na estação terrestre? Porquê?)



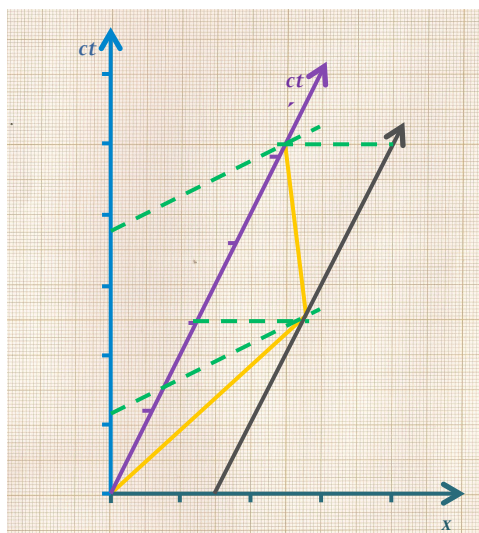
A



B



C



D

- Linha do mundo do sinal luminoso.
- Linha do mundo da estação terrestre.
- Linha do mundo da antena A (na nave).
- Linha do mundo do espelho E (na nave).

Questionário sobre a TRR

Por favor responda ao seguinte questionário em:

https://docs.google.com/forms/d/1E9vInWPaftPt351oHFBCkdfZjMVaXPSd9e_uBqKI3j8/viewform

Anexo V — Resultados dos testes sobre as concepções dos professores

Anexo V — Quadro dos resultados dos testes sobre as concepções da TRR dos professores

Questões		1	2	3	4	5	6	7
Prof 1	Pré	TRR: (Correto. Justificação correta)	PE: (Distância diferente. A nave N_B desloca-se em sentido oposto)	RG: (Distância diferente. A nave N_A desloca-se em sentido oposto).	TRR: (Mesmo tempo. Distância é igual)	PE: (Mais tempo de E a A. A nave está a afastar-se do observador e o sinal chega-lhe em “diferido”)	RG PE: (Mais tempo de A a E, para a nave. Soma de velocidades, sendo maior que c (efeito de Doppler))	RG PE: (Mais tempo de E a A, para quem está na estação terrestre. Soma das velocidades (efeito de Doppler)).
	Pós	TRR: (Correto. Não justifica)	PE: (Distância diferente. O sinal L_B desloca-se no mesmo sentido da nave N_B e o sinal L_A desloca-se no sentido oposto).	RG: (Distância diferente. O sinal L_A mais próximo e L_B mais afastado).	TRR: (Idêntico).	PE: (Mais tempo de E a A porque a nave está mais longe da estação terrestre).	TRR: (Mais tempo de A a E, para a estação terrestre). PE: (Distância entre o observador e o sinal aumenta)	PE: (Mais tempo de E a A, para quem está na estação terrestre. A distância é maior).
Prof 2	Pré	TRR: (As distância do sinal L_A e a nave N_A à antena A_1 estão corretas. A justificação está correta. PE: A distância da N_B está incorreta. Justifica recorrendo a um esquema, considerando a distância $3/2 d$ de A_2 , em vez de A_1)	TRR: (Distância igual. Justificação está errada, considera $d/2$)	TRR: (Distância igual. Justificação está errada, considera $d/2$)	TRR: (Idêntico).	Não fez	Não fez	Não fez
	Pós	TRR: (Igual. Não justifica)	PE: (Distância diferente. Não justifica).	RG: (Distância diferente. Não justifica).	TRR: (Idêntico).	TRR: (Mais tempo de A a E Justifica com um esquema).	TRR: Mais tempo de A a E, para a estação terrestre. Não justifica	TRR: (Menos tempo de E a A, para a estação terrestre. Não Justifica).
Prof 3	Pré	TRR: (Correto. Justificação correta, apesar de na nave N_A ter escrito distância a A_2 , em vez de A_1)	RG: (Distância diferente A. distância a L_B é $d/2$ e a L_A é $3/2d$. A justificação é feita considerando o referencial da Terra.).	RG: (Distância diferente. A. distância a L_A é $d/2$ e a L_B é $3/2d$. A justificação é feita considerando o referencial da Terra.)	TRR: (Mesmo tempo. Distância é igual a velocidade do sinal também é igual. PE: $c/2$)	TRR: (Mais tempo de A a E. Dado que a nave também se movimentava na mesma direção e sentido. O sinal demora menos tempo a regressar pelo mesmo motivo).	TRR: (Mais tempo de A a E, para a estação terrestre. Justificação correta).	TRR: (Mais tempo de E a A, para a nave. Justificação correta).
	Pós	TRR: (Correto. Justificação correta)	PE: (Distância diferente. distância a L_B é $d/2$ e a L_A é $3/2d$. Refere mudança de referencial mas a explicação é feita considerando o referencial da Terra).	RG: (Distância diferente. A. distância a L_A é $d/2$ e a L_B é $3/2d$. A justificação é feita considerando o referencial da Terra.)	TRR: (Mesmo tempo. Se a distância é igual o tempo também é).	TRR: (Idêntico).	TRR: (Idêntico).	TRR: (Idêntico).
Prof 4	Pré	TRR: (Correto. Justificação correta)	RG: (Distância maior ao sinal L_A . distância a L_B é $d/2$ e a L_A é $d+1/2d$. A justificação é feita considerando o referencial da Terra).	RG: (Distância diferente. A. distância a L_A é $d/2$ e a L_B é $d+1/2d$. A justificação é feita considerando o referencial da Terra.)	TRR: (Mesmo tempo. O sinal percorre a mesma distância com o mesmo valor da velocidade).	TRR: (Idêntico).	TRR: (Idêntico).	TRR: (Mais tempo de E a A, para a nave. Correto)
	Pós	TRR: (Correto. Justificação correta)	RG: (Idêntico). distância a L_B é $d/2$ e a L_A é $d+1/2d$.	RG: (Distância diferente. A. distância a L_A é $d/2$ e a L_B é $d+1/2d$.	TRR: (Idêntico).	TRR: (Mais tempo de A a E. Justificação com esquemas).	TRR: (Idêntico).	TRR: (Mais tempo de E a A, para a nave. Correto)
Prof 5	Pré	TRR: (Correto. Justificação correta)	RG: (Idêntico). distância a L_B é $d/2$ e a L_A é $3/2d$	RG: A. distância a L_A é $d/2$ e a L_B é $3/2d$	PE: (Demora mais tempo a ir de A a E porque o espelho se encontra a afastar da antena. O sinal de regresso A demoraria menos tempo porque A se	TRR: (Mais tempo de A a E. Justificação correta).	TRR PE: (Mais tempo de A a E, para a estação terrestre. Distância entre o observador e o sinal aumenta).	PE: (Mais tempo de E a A, para quem está na estação terrestre).

		aproxima de E encurtando a distância ser percorrida pelo sinal luminoso).						
	Pós	TRR: (Correto. Justificação incompleta).	RG: (Idêntico). distância a LB é d/2 e a LA é 3/2d	RG: A. distância a LA é d/2 e a LB é 3/2d	TRR: (Mesmo tempo. O sinal percorre a mesma distância com velocidade constante).	TRR: (Idêntico).	TRR PE: (Idêntico).	TRR: (Mais tempo de E a A, para a nave. Justificação incompleta).
	Pré	TRR: (Correto. Justificação correta)	RG: (Idêntico). distância a LB é d/2 e a LA é 3/2d	RG: A. distância a LA é d/2 e a LB é 3/2d.	PE: (Demora mais tempo a ir de A a E. A nave e o sinal viajam no mesmo sentido. A distância que o sinal percorre é maior do que d).	RG: (Mais tempo de E a A. De A a E soma as velocidades ultrapassando c. De E a A subtrai as velocidade).	PE: Mais tempo de A a E, para a nave. Não justifica	PE: (Mais tempo de E a A, para quem está na estação terrestre. Não justifica).
Prof 6	Pós	TRR: (Correto. Justificação correta)	RG: (Idêntico). distância a LB é d/2 e a LA é 3/2d	RG: A. distância a LA é d/2 e a LB é 3/2d	PE: Demora mais tempo a ir de A a E. Porque à medida que a luz avança de A para E o espelho tb o que faz com que a luz percorra uma distância maior	RG: (Mais tempo de E a A. Não justifica)	PE: Mais tempo de A a E, para a nave. Não justifica	PE: (Mais tempo de E a A, para quem está na estação terrestre. Não justifica).
	Pré	TRR: (As distância do sinal L_A e a nave N_A à antena A_1 estão corretas, apesar de não distinguem d , distância de A_1 a A_2 , das outras distâncias. PE: (A distância da N_B está incorreta. $d=(c \times t)/4$	RG: (Distância maior ao sinal L_A sinal L_A desloca-se no sentido oposto a N_B).	RG: PE: (Distância de L_A à nave N_A é inferior à distância de L_B à nave N_A visto os sinais terem a mesma velocidade e o sinal L_A deslocam-se no mesmo sentido de N_A).	PE: Demora mais tempo a ir de A a E. A nave e o sinal viajam no mesmo sentido o que implica que à medida que o sinal avança, a nave também avança. De A a E $t = 2d/c + t = d/c$	PE: (Mais tempo de E a A, visto ser necessário somar o tempo que demora a chegar à estação terrestre(está mais longe)).	TRR PE: (Mais tempo de A a E, para a estação terrestre. Distância entre o observador e o sinal aumenta).	PE: (Mais tempo de E a A, para quem está na estação terrestre. Porque é necessário somar o tempo envolvido no regresso à estação terrestre).
Prof 7	Pós	TRR: (a resposta é igual à anterior).	RG: (a resposta é igual à anterior).	RG: (a resposta é igual à anterior).	PE: (a resposta é igual à anterior).	PE: (a resposta é igual à anterior).	TRR PE: (a resposta é igual à anterior).	PE: (a resposta é igual à anterior).
	Pré	TRR: (Correto. Justificação incompleta)	RG: PE: (Distância diferente. "Como voo na nave NB acompanho juntamente com NB a distância que NB percorre"	RG: (Distância diferente. . "Como voo na nave NA acompanho juntamente com NA a distância que NA percorre"	TRR: (Mesmo tempo. Distância é igual).	TRR: (Mais tempo de A a E. Não justifica).	Não fez	Não fez
Prof 8	Pós	TRR: (A distância do sinal L_A à antena A_1 está correta. A distância N_A está incompleta. Não justifica. PE: A distância N_B incorreta. Justifica, com soma de distâncias de forma incorreta.	TRR: (Igual distância. PE: Apesar de viajar na NB, ou seja, continua implicitamente a usar o referencial a Terra)	TRR: (Igual distância. PE: Apesar de viajar na NB, ou seja, continua implicitamente a usar o referencial a Terra)	TRR: (Mesmo tempo. Distância é igual).	PE: (Mesmo tempo de A a E. Diminuição é a mesma entre A e E, independentemente dos referenciais)	PE: (Independentemente do referencial o sinal demora o mesmo tempo)	PE: (Independentemente do referencial o sinal demora o mesmo tempo)
	Pré	TRR: (Correto. Justificação correta)	TRR: (Igual distância. Justificação correta)	TRR: (Igual distância. Justificação correta).	TRR: (Mesmo tempo).	PE: (mesmo tempo, pois o valor da velocidade não depende do referencial escolhido)	PE: Idêntico	PE: (Idêntico)
Prof 9	Pós	TRR: (Correto. Justificação correta)	RG: (Distância maior ao sinal L_A . A justificação é feita considerando o referencial da Terra distância a LB é d/2 e a LA é 3/2d)	RG: (Distância diferente. A. distância a LA é d/2 e a LB é 3/2d.	TRR: correto	TRR: (Mais tempo de A a E. Não justifica).	TRR PE: (Mais tempo de A a E, para a estação terrestre. Ignora o aumento da distância. Considera a dilatação do tempo).	PE: (Idêntico)

Anexo VI — Resultados dos testes das concepções dos alunos

Anexo VI — Quadro dos resultados dos testes sobre as concepções da TRR dos alunos

Questões	1	2	3	4	5	6	7
Aluno 1	TRR: (Sinal LA correto. Nave A e Nave B incompleto) Diagrama (C) correto	PE: (A distância de LB é menor do que a distância LA. LB tem a direção do movimento de NB e LA oposto) Diagrama (A) correto	PE: (A distância de LA é menor do que a distância LB. LA tem a direção do movimento de NA e LB oposto) Diagrama (D) correto	TRR: (Mesmo tempo. Justificação incompleta) Diagrama (B) correto	TRR: (Mais tempo de A a E. Justificação correta) Diagrama (A) correto	PE: (Mesmo tempo. Não justifica) Diagrama (B) correto	TRR: (Mais tempo de E a A. Justificação correta) Diagrama (B) correto
Aluno 2	TRR: (Correto. Justificação correta) Diagrama (C) correto	RG: (A distância de LB é menor do que a distância LA. LA e LB movem-se com o dobro da velocidade de NB) Diagrama (A) correto	RG?: (A distância de LA é menor do que a distância LB. NA movem-se com metade da velocidade e o deslocamento a favor de LA e oposto a LB) Diagrama (D) correto	TRR: (Mesmo tempo. Distância é igual) Diagrama (B) correto	TRR: (Mais tempo de A a E. Justificação correta) Diagrama (A) correto	TRR: (Mais tempo de A a E na estação terrestre. Justificação correta) Diagrama (B) correto	TRR: (Mais tempo de E a A. Justificação correta) Diagrama (B) correto
Aluno 3	TRR: (Correto. Justificação correta) Diagrama não fez	RG: (Distância diferente. distância a LB é $d/2$ e a LA é $3/2d$. Diagrama não fez	RG: (Distância diferente. distância a LA é $d/2$ e a LB é $3/2d$. Diagrama não fez	PE: Demora mais tempo a ir de E a A. Não justifica. Diagrama não fez	Não fez Diagrama não fez	TRR: (Mais tempo de A a E na estação terrestre. Não justifica) Diagrama não fez	Diagrama não fez
Aluno 4	TRR: (Correto. Justificação correta) Diagrama (A) incorreto	PE: (A distância de LB é menor do que a distância LA. LB tem a direção de NB e LA oposto) Diagrama (B) incorreto	PE: (A distância de LA é menor do que a distância LB. LB tem a direção de NB e LA oposto) Diagrama (C) incorreto	TRR: (Mesmo tempo. Distância é igual) Diagrama (C) incorreto	TRR, PE?: (Mais tempo de A a E. Justificação correta dando a sensação que o tempo é menor...) Diagrama (A) correto	TRR, PE: (Mais tempo de A a E na estação terrestre. observador na estação se encontra a uma maior distância do acontecimento, e o observador vê também a nave e o sinal a viajarem no mesmo sentido) Diagrama (B) correto	TRR: (Mais tempo de E a A. Justificação correta) Diagrama (B) correto
Aluno 5	TRR: (Correto. Justificação correta) Diagrama (A) incorreto	RG: (Distância diferente. distância a LB é $d/2$ e a LA é $3/2d$. Diagrama (B) incorreto	RG: (A distância de LA é menor do que a distância LB. distância a LA é $d/2$ e a LB é $3/2d$. Diagrama (C) incorreto	PE: (Demora mais tempo a ir de A a E porque a nave desloca-se do sentido A para E) Diagrama (A) incorreto	PE: (Demora menos tempo a ir de A a E. Porque vê a nave a afastar-se cada vez mais, o sinal luminoso demora menos tempo a percorrer a mesma distância) Diagrama (C) incorreto	PE: (Mais tempo a percorrer a distância A a E na nave. Justificação igual a 4 e 5) Diagrama (B) correto	PE: (Mais tempo a percorrer a distância E a A na estação. Justificação igual a 4 e 5) Diagrama (C) incorreto
Aluno 6	TRR: (Correto. Justificação correta) Diagrama (C) correto	PE: (Distância diferente. Eu viajo na direção LB e LA oposto) Diagrama (D) incorreto	PE: (Distância diferente. Eu viajo com a luz LA e afasto-me de LB) Diagrama (A) incorreto	TRR: (Mesmo tempo. Distância é igual) Diagrama (B) correto	TRR, PE?: (Mais tempo de A a E. Justificação correta dando a impressão de que é mais curto na volta) Diagrama (A) correto	TRR: (Mais tempo de A a E na estação terrestre. Justificação incompleta) Diagrama (B) correto	TRR: (Mais tempo de E a A. Justificação correta) Diagrama (B) correto
Aluno 7	TRR: (As distância do sinal L_A e a nave N_A à antena A_1 estão corretas. A justificação está correta. A distância da N_B está incorreta. Justifica recorrendo a um esquema, considerando a distância d de NA a N_B , em vez de A_1) Diagrama (C) correto	PE: (Distância diferente. Eu viajo na direção LB e LA oposto) Diagrama (D) incorreto	PE: (Distância diferente. LA move-se na direção de NA e afasto-me de LB) Diagrama (A) incorreto	TRR: (Mesmo tempo. Distância é igual) Diagrama (B) correto	TRR: (Mais tempo de A a E. Justificação incompleta) Diagrama (A) correto	TRR: (Mais tempo de A a E na estação terrestre. Justificação incompleta) Diagrama (B) correto	TRR: (Mais tempo de E a A. Justificação incompleta) Diagrama (B) correto
Aluno 8	TRR: (Correto. Justificação correta) Diagrama (C) correto	PE: (A distância de LB é menor do que a distância LA. LB tem a direção de NB e LA oposto) Diagrama (C) incorreto	PE: (A distância de LA é menor do que a distância LB. LB tem a direção de NB e LA oposto) Diagrama (B) incorreto	TRR: (Mesmo tempo. Distância é igual) Diagrama (B) correto	PE: (Mais tempo de E a A, explicação com esquemas (mais longe)) Diagrama (A) correto	TRR, PE: (Mais tempo de A a E na estação terrestre. Com o afastamento do sinal da estação terrestre o sinal é visualizado depois) Diagrama (B) correto	PE: (Mais tempo a percorrer a distância E a A na estação, como em 6) Diagrama (B) correto